

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

LARISSA PEREIRA LOPES MARTINEZ

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE DIFERENTES MATERIAIS DE
COBERTURA FRENTE À CHUVA DE GRANIZO, A PARTIR DO
IMPACTO DE UMA ESFERA DE AÇO**

Trabalho de Conclusão de Curso

LONDRINA

2016

LARISSA PEREIRA LOPES MARTINEZ

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE DIFERENTES MATERIAIS DE
COBERTURA FRENTE À CHUVA DE GRANIZO, A PARTIR DO
IMPACTO DE UMA ESFERA DE AÇO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso Superior de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Moreno Peres

LONDRINA

2016



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Londrina
Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais
Coordenação de Engenharia de Materiais



TERMO DE APROVAÇÃO

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE DIFERENTES MATERIAIS DE COBERTURA FRENTE À CHUVA DE GRANIZO, A PARTIR DO IMPACTO DE UMA ESFERA DE AÇO

Por

LARISSA PEREIRA LOPES PARTINEZ

Monografia apresentada no dia 03 de novembro de 2016 ao Curso Superior de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho **APROVADO.**

Prof. Dr. Fabiano Moreno Peres

(UTFPR - Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais-DAEMA-LD)
Orientador

Prof. Dr. Francisco Rosario

(UTFPR - Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais-DAEMA-LD)

Prof. Dra. Sueli Tavares de Melo Souza

(UTFPR - Departamento Acadêmico de Ambiental- DAAMB-LD)

Prof. Dr. Odney Carlos Brondino

Responsável pelo TCC do Curso de Engenharia de Materiais

Obs.: A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia de Materiais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, em especial:

Ao orientador Prof. Dr. Fabiano Moreno Peres por toda a sua dedicação e comprometimento durante todo o trabalho, sem medir esforços para me ajudar sempre que foi preciso;

Aos professores membros da banca, Sueli Tavares e Francisco Rosário, por todas as contribuições feitas para a melhoria deste trabalho;

À todos os professores, servidores e técnicos de laboratório da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Londrina, especialmente ao técnico Filippe Bernardino pelo auxílio prestado na preparação dos dispositivos de ensaio;

Aos meus pais, Ana Maria e Marcio, e meu irmão, Lucas, por todo o carinho, apoio e incentivo;

Ao meu namorado, Walter, pela ajuda durante o trabalho e pelo companheirismo de sempre;

Aos amigos que conquistei durante a Universidade pela convivência fraterna.

*“Para ser grande, sê inteiro: nada
Teu exagera ou exclui.
Sê todo em cada coisa. Põe quanto és
No mínimo que fazes.
Assim em cada lago a lua toda
Brilha, porque alta vive”.*

(Fernando Pessoa, 1933).

RESUMO

MARTINEZ, Larissa P.L. Estudo do comportamento de diferentes materiais de cobertura frente à chuva de granizo, a partir do impacto de uma esfera de aço. 2016. 86p. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso Superior em Bacharelado de Engenharia de Materiais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2016.

As recentes mudanças climáticas vêm aumentando a incidência de chuvas e tempestades de granizo, as quais podem danificar residências, prédios, indústrias, plantações, automóveis, entre outros. Sendo assim, torna-se cada vez mais necessário o estudo dos materiais de cobertura, quanto à resistência ao impacto por granizo. A simulação do granizo é complexa devido a sua morfologia específica, portanto muitos estudos de simulação são feitos utilizando esferas de aço e esferas de gelo. No Brasil, a norma ABNT NBR 15575-5 – Anexo C descreve um método de ensaio para verificar a resistência de telhados em relação a danos por granizo, pedras e outros, utilizando esferas de aço como percussor de impacto. Neste trabalho foi analisada a ocorrência de dano em diferentes materiais de cobertura em relação ao ensaio de queda livre de uma esfera de aço de diâmetro igual a uma polegada, de acordo com a norma NBR 15575-5. Aliado a ocorrência de dano, também foi medido o coeficiente de restituição para os materiais, buscando correlacionar uma quantidade associada à habilidade do material de resistir ao impacto com as observações dos efeitos da queda de peso. O coeficiente de restituição foi medido de acordo com adaptações da norma NBR 13818 – Anexo Q. Os valores de coeficiente de restituição foram relacionados com a quantidade de energia absorvida e/ou devolvida pelos materiais de cobertura, avaliando a susceptibilidade ao dano dos materiais por queda de corpo-rígido. Nas telhas cerâmicas foram realizados ensaios de resistência mecânica em flexão de três pontos. Os resultados demonstraram que o impacto de partículas sólidas, como o granizo, sobre materiais de cobertura, dependendo da energia incidente, provocam efeitos cosméticos nos materiais. Além disso, no caso das telhas cerâmicas e de fibrocimento, o impacto de partículas sólidas provoca o surgimento de fissuras ou defeitos assemelhados no material, podendo levar à falha funcional da telha (perda da estanqueidade). No caso das telhas cerâmicas, os resultados dos ensaios mecânicos sugerem redução da resistência mecânica. Entretanto, a verificação da eventual redução da resistência mecânica das telhas cerâmicas requer maior evidência experimental.

Palavras-chave: Granizo. Materiais de cobertura. Resistência ao impacto. Coeficiente de restituição. Telha cerâmica. Telha de fibrocimento. Telha metálica.

ABSTRACT

MARTINEZ, Larissa P.L. Study of different roofing materials' behaviour against the impact of hail, simulated by an ice sphere. 2016. 86p. Monography (Graduation) – Bachelor's Degree in Materials Engineering. Federal Technological University of Paraná, Londrina, 2016.

Recent climate changes have increased the incidence of rain and hail storms, which can damage homes, buildings, factories, plantations, automobiles, among others. Thus, the study of roofing materials has become extremely necessary in regard of resistance to impact by hail. The simulation of hail is complex because of its specific morphology, therefore many simulation studies have been made using steel balls and ice balls. In Brazil, the standard ABNT NBR 15575-5 - Annex C describes a test method to verify the roofing material's resistance to hail damage, stones and others by using steel balls. In this work the occurrence of damage in different types of roofing materials in relation to the free drop of a steel ball with an inch diameter was analysed according to the standard. In addition, the coefficient of restitution for the materials was measured to correlate the result with the ability of the material to resist the impact. The coefficient of restitution is measured according to adaptations of the standard NBR 13818 - Annex Q. The coefficient of restitution values were related to the amount of absorbed and/or returned energy by the material and with the susceptibility to damage from a dropping rigid body. Ceramic tiles were performed on a three-point bending test. The results showed that the impact of solid particles, such as hail, can cause cosmetic effects on covering materials depending on the incident energy. Furthermore, the impact of solid particles gives rise to fissures or similar defects in ceramic and fiber cement tiles, and may lead the tiles to a functional failure (loss of tightness). Considering the ceramic tiles, the results of the mechanical test suggest reduction of mechanical strength. However, this verification of any reduction in the mechanical strength of the ceramic tiles requires further experimental evidence.

Keywords: Hail. Roofing materials. Impact resistance. Coefficient of restitution. Ceramic tile. Fiber cement tile. Metallic tile.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração da secção transversal de um granizo.	20
Figura 2 - Impacto central de duas partículas A e B.....	30
Figura 3 – Eletro-ímã utilizado no ensaio NBR15575 - Anexo C.	37
Figura 4 – Representação do pano de telhas cerâmicas com apoios de madeira (a) e modelo de telha cerâmica romana (b). Fonte: Adaptado de Telhas Polla.....	38
Figura 5 – Ilustração dos panos de telhas cerâmicas (a) e telha de fibrocimento (b). As setas indicam as regiões das telhas onde foram impostos os impactos com esfera de aço.....	38
Figura 6 – Aparato experimental utilizado para ensaio de acordo com a norma NBR 15575-5, composto por tubo-guia graduado com eletro-ímã acoplado e esfera de aço de 1 polegada.	39
Figura 7 – Regiões de incidência da esfera de aço nos materiais de cobertura.	40
Figura 8 – Curva energia de impacto (E) versus Diâmetro do granizo (d) para os dados apresentados na tabela 3 (LAURIE (1960)).	42
Figura 9 – Corpos-de-prova de fibrocimento (4mm) e de cerâmica romana colados em bloco de concreto conforme NBR 13818.....	45
Figura 10 – Ilustração dos moldes de madeira utilizados na	45
Figura 11 – Ilustração do aparato para a.....	46
Figura 12 – Dispositivo para aplicação de carga para telha	49
Figura 13 – Ilustração do dispositivo para ensaio de flexão simples em telhas cerâmicas do tipo romana.	50
Figura 14 – (a) Marca superficial após impacto de esfera de aço em telha cerâmica a 0,5 metros; (b) Ampliação indeterminada com o zoom da máquina fotográfica da marca de impacto.	54
Figura 15 – (a) Marca superficial após impacto de esfera de aço em telha cerâmica a 1,0 metro com ampliação de aproximadamente 2x; (b) Marcas escuras na face posterior da telha ao ponto de impacto após imersão em água.	55

Figura 16 – (a) Marca superficial após impacto de esfera de aço em telha cerâmica a 1,5 metros com ampliação de aproximadamente 2x; (b) Nucleação de defeitos na face posterior da telha ao ponto de impacto após imersão em água.	56
Figura 17 – (a) Marca superficial após impacto de esfera de aço em telha cerâmica a 2,0 metros com ampliação de aproximadamente 2x; (b) Nucleação de defeitos na face posterior da telha ao ponto de impacto após imersão em água propagando-se no sentido indicado pela seta.	56
Figura 18 – (a) Marca superficial após impacto de esfera de aço em telha cerâmica a 2,5 metros com ampliação de aproximadamente 2x; (b) Nucleação de defeitos na face posterior da telha ao ponto de impacto após imersão em água propagando-se no sentido indicado pela seta.	57
Figura 19 – (a) Marca superficial após impacto de esfera de aço em telha cerâmica a 3,0 metros com ampliação de aproximadamente 2x; (b) Nucleação de defeitos na face posterior da telha ao ponto de impacto após imersão em água propagando-se no sentido indicado pela seta e surgimento de trinca aparente com ampliação de aproximadamente 2x; (c) Ampliação da trinca de aproximadamente 4x.	58
Figura 20 – Telha cerâmica impactada a partir de 2 metros; (a) Face posterior de telha sem nenhum impacto; (b) Nucleação de defeitos na face posterior da telha ao ponto de impacto após um impacto; (c) Nucleação de defeitos na face posterior da telha ao ponto de impacto após dois impactos sucessivos; (d) Nucleação de defeitos na face posterior da telha ao ponto de impacto após três impactos sucessivos.	60
Figura 21 – (a) Face posterior de telha cerâmica após três impactos sucessivos de 2 metros e imersão em água; (b) Ampliação de aproximadamente 2x da trinca na face posterior da telha.	61
Figura 22 - Curva altura de lançamento versus coeficiente de restituição para amostras de telhas cerâmicas romanas.	62
Figura 23 – Imagem obtida em ensaio de fotoelasticidade de corpo-de-prova de seção retangular submetido à flexão de três pontos.	69
Figura 24– Imagem obtida em ensaio de fotoelasticidade de corpo-de-prova de seção retangular submetido à flexão de quatro pontos.	69

Figura 25 – Gráfico de Weibull correspondente aos resultados dos ensaios de flexão de três pontos apresentados na tabela 13.	71
Figura 26 – Parte superior de telha de fibrocimento após impactos de uma esfera de aço a partir de alturas de (a) 0,5 m; (b) 1,0 m; (c) 1,5 m; (d) 2,0 m; (e) 2,5 m; (f) 3,0 m. As marcas I indicam as marcas de impacto causadas pela esfera de aço de 1 polegada; as marcas II indicam a ocorrência de fissuras acima e abaixo da marca de impacto. ...	73
Figura 27 – Representação dos efeitos ocorridos em telhas metálicas após impactos de granizo.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação de tamanhos de granizo com objetos conhecidos.	21
Tabela 2 – Expressões de deformação e restituição para partículas A e B.	31
Tabela 3 – Velocidade terminal e energia de impacto aproximada de granizos.	33
Tabela 4 – Condições de ensaio de resistência ao impacto de sistemas de cobertura.	40
Tabela 5 – Condições de ensaio adotadas para lançamento do percussor de impacto.	41
Tabela 6 – Diâmetro do granizo e sua respectiva energia de impacto aproximada considerando dados da tabela 3.	42
Tabela 7 – Classificação do tipo de dano ocorrido.	43
Tabela 8 – Verificação dos requisitos estabelecidos pela norma ABNT NBR 15575-5 – Anexo C para telhas cerâmicas romanas.	53
Tabela 9 – Classificação dos danos por impacto observados em telhas cerâmicas para diferentes energias de impacto.	59
Tabela 10 – Resultados de coeficiente de restituição médio para amostras de telhas cerâmicas romanas a partir de queda de uma esfera de aço a diferentes alturas.	62
Tabela 11 – Resultados dos testes estatísticos de comparação de variância dos valores de coeficiente de restituição de telhas cerâmicas.	64
Tabela 12 – Resultados de ANOVA das médias de coeficiente de restituição de telhas cerâmicas.	64
Tabela 13 – Resultados do ensaio de flexão simples com telhas cerâmicas impactadas uma única vez a partir de diferentes alturas.	66
Tabela 14 – Resultados do ensaio de flexão simples em telhas cerâmicas não impactadas, impactadas uma única vez e impactadas três vezes a partir de 2 metros.	67
Tabela 15 - Resultados dos testes estatísticos de comparação de variância dos valores de resistência à flexão de telhas cerâmicas.	67
Tabela 16 – Resultados de ANOVA das médias de resistência à flexão das telhas cerâmicas.	68
Tabela 17 – Classificação dos danos por impacto observados em telha de fibrocimento para diferentes energias de impacto.	75
Tabela 18 – Resultados de coeficiente de restituição médio para amostras de telhas de fibrocimento a partir da queda de uma esfera de aço a partir de 2 metros.	76

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
UL	<i>Underwriters Laboratories</i>
FM	<i>Factory Mutual Research Corporation</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

\vec{Q}	Quantidade de movimento
\vec{v}	Velocidade
\vec{a}	Aceleração
\vec{F}	Força resultante
\vec{I}	Impulso de uma força
t	Tempo
m	Massa
E_p	Energia potencial
E_k	Energia cinética
E_T	Energia total
m_{gr}	Massa do granizo
g	Constante gravitacional
h	Altura
$\int Fdt$	Impulso de deformação
$\int Rdt$	Impulso de restituição
e	Coeficiente de restituição
E	Energia de impacto
d	Diâmetro do granizo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 JUSTIFICATIVA	17
2 OBJETIVOS	18
2.1 OBJETIVO GERAL.....	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3 REFERENCIAL TEÓRICO	19
3.1 FORMAÇÃO DO GRANIZO.....	19
3.2 CARACTERÍSTICAS DO GRANIZO	20
3.3 DANOS CAUSADOS POR GRANIZO.....	22
3.3.1 Dano Funcional e Cosmético.....	22
3.3.2 Estimativa da Criticidade do Granizo.....	24
3.4 INTRODUÇÃO AOS FUNDAMENTOS DA MECÂNICA DO IMPACTO.....	25
3.4.1 Leis Fundamentais da Dinâmica.....	26
3.4.2 Teoremas Gerais da Dinâmica do Ponto Material.....	27
3.4.3 Conservação de Energia Aplicada ao Granizo.....	28
3.4.4 Coeficiente de Restituição	29
3.4.5 Velocidade Terminal do Granizo.....	32
3.5 MATERIAIS DE COBERTURA/TELHADOS	34
4 MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1 NBR 15575-5 (ANEXO C) – VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO	36
4.1.1 Materiais e Equipamentos.....	36
4.1.2 Preparação das Amostras.....	37
4.1.3 Procedimento de Ensaio	38
4.2 NBR 13818 (ANEXO Q) – DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO	44
4.2.1 Materiais e Equipamentos.....	44
4.2.2 Preparação dos Corpos-de-prova.....	44
4.2.3 Procedimento de Ensaio	46
4.2.4 Vídeo Análise	47
4.3 NBR 15310 (ANEXO C) – CARGA DE RUPTURA À FLEXÃO	48
4.3.1 Materiais e Equipamentos.....	49
4.3.2 Preparação dos Corpos-de-Prova	50
4.3.3 Procedimento de Ensaio	50
4.4 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS.....	51
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1 TELHA CERÂMICA.....	53
5.1.1 Resultados de Acordo com a Norma NBR 15575 – Anexo C.....	53
5.1.2 Considerações em Relação à Norma NBR 15575-5 – Anexo C.....	54
5.1.3 Coeficiente de Restituição	61
5.1.4 Ensaio de Flexão Simples (FR)	66
5.2 TELHA DE FIBROCIMENTO.....	72
5.2.1 Resultados de Acordo com a Norma NBR 15575 – Anexo C.....	72
5.2.2 Coeficiente de Restituição	76
5.3 TELHA METÁLICA.....	77
6 CONCLUSÕES	78
REFERÊNCIAS	80
APÊNDICE A.....	84
APÊNDICE B.....	85

1 INTRODUÇÃO

As tempestades de granizo vêm causando danos consideráveis em residências, prédios, indústrias, automóveis, aviões e plantações agrícolas (Anuário Brasileiro de Desastres Naturais, 2013).

De acordo com Cullen (1997), as tempestades de granizo raramente produzem pedras de gelo de tamanhos, formas ou densidades uniformes. Os granizos gerados são, na maioria dos casos, de dimensões relativamente pequenas e oferecem pouco risco às coberturas. Entretanto, a cada ano nota-se o aumento da faixa de tamanho das pedras de granizo, as quais já chegaram a medir 100 mm de diâmetro.

No Brasil, as regiões mais afetadas em 2013 foram o Sul e o Sudeste, sendo que, dos 29 desastres identificados pela ocorrência de granizo, 26 estavam localizados na região Sul e os outros 3 na região Sudeste (Anuário Brasileiro de Desastres Naturais, 2013). Nesse mesmo ano foram registradas mais de 15 mil pessoas desabrigadas ou desalojadas, e um total de cerca de 175 mil pessoas afetadas pelo granizo. Os meses de maior incidência foram de setembro a dezembro.

No estado do Paraná, em 2009, a ocorrência de granizo foi mais pronunciada nas regiões centro-sul e sul do estado, nos meses de setembro, outubro e novembro (período da Primavera). Isso se deve ao fato de que, segundo Urquiza et. al. (2009),

O Paraná está numa região convergente a diferentes tipos de massas de ar com destaque para a polar e a tropical. Isto o torna uma área propensa a condições de instabilidade atmosférica para a formação de fenômenos de tempestades, como a precipitação de granizo.

Mais recentemente, em setembro de 2015, mais de 50 cidades brasileiras foram prejudicadas pelas tempestades de granizo, com milhares de casas danificadas e plantações devastadas (G1, 2015). Na cidade de Cachoeira do Sul pelo menos 100 casas foram atingidas, além do hospital de Sapucaia do Sul, o qual foi destelhado e os pacientes tiveram que ser transferidos, em outubro do mesmo ano.

Segundo Koontz (1991) e Cullen (1997), os danos nas coberturas de residências e indústrias causados pelas tempestades de granizo, resultam em milhões de dólares por ano nos Estados Unidos.¹

De acordo com Hutchinson e Koontz (2009), pelo menos uma agência de seguros norte americana permite que as companhias de seguros ofereçam uma redução nas taxas de seguro, caso um tipo de material de cobertura resistente ao granizo for instalado. Sendo assim, os donos de propriedades estão começando a perceber a importância da instalação de sistemas de coberturas resistentes ao granizo.

Existem muitos estudos feitos por várias organizações, especialmente nos Estados Unidos, Canadá e Europa, com o objetivo de classificar o impacto ou a resistência ao granizo de sistemas de cobertura e fornecer métodos de testes para quantificar essa resistência (CRENSHAW E KOONTZ, 2000), além de existirem normas específicas nos Estados Unidos, relacionadas ao assunto (FM 4473; UL 2218; ASTM D3746).

No Brasil faltam estudos mais amplos sobre essa temática, apesar de existir uma norma específica da ABNT para tratar da resistência ao impacto em telhados (ABNT NBR 15575-5 – Anexo C). Entretanto, esta norma não estabelece uma relação quantitativa entre a habilidade do material de resistir ao impacto de corpos rígidos e o dano efetivamente observado nos materiais de cobertura.

Neste trabalho propoem-se adotar o coeficiente de restituição como um parâmetro complementar ao método da queda de esfera rígida para o estudo do comportamento de diferentes materiais de cobertura, frente ao impacto de partículas sólidas.

¹ Não foi possível obter estimativa de valores econômicos dos prejuízos das tempestades de granizo no Brasil.

1.1 JUSTIFICATIVA

No Brasil ainda há poucos estudos sistematizados para a avaliação do comportamento dos diferentes materiais de cobertura frente ao impacto de granizo, o que torna justificável o desenvolvimento deste trabalho.

A limitação da norma da ABNT NBR 15575-5 para avaliação do comportamento dos diferentes materiais de cobertura quando submetidos ao impacto de corpos sólidos está na sua natureza essencialmente empírica, no sentido de que os resultados se baseiam apenas na observação da superfície atingida, sem justificativas em princípios físicos.

Assim, neste trabalho também é proposto a adoção do coeficiente de restituição, como parâmetro de comparação de diferentes materiais quanto à habilidade para “restituir” a energia cinética ao corpo incidente no choque. Embora o coeficiente de restituição também seja um valor determinado empiricamente (experimentalmente), a sua definição envolve os princípios de conservação da energia e do princípio momento-impulso. Nesse sentido, a redução do coeficiente de restituição levaria em consideração, entre outros fatores de perda de energia cinética, a deformação permanente do material.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar o comportamento de diferentes materiais de cobertura frente ao impacto por granizo, por meio de simulação com esferas de aço.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estabelecer critérios para avaliar o dano por impacto nos diferentes materiais de cobertura.
- Estimar o dano por impacto nos diferentes materiais.
- Testar a sensibilidade do coeficiente de restituição para medir o dano por impacto em materiais de cobertura.
- Propor uma metodologia de avaliação da resistência ao impacto de corpos sólidos de telhados.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 FORMAÇÃO DO GRANIZO

Changnon, Changnon D. e Hilberg (2009) afirmam que a formação do granizo é resultado de quatro fatores atmosféricos:

1. Instabilidades convectivas originando intensas correntes de ar ascendentes;
2. Excesso de umidade, a qual alimenta as correntes de ar ascendentes;
3. Ventos fortes no alto que auxiliam na formação de movimentos verticais;
4. Alguns mecanismos dinâmicos que podem ajudar na liberação de instabilidades.

De acordo com o Anuário Brasileiro de Desastres Naturais (2013), granizo é uma forma de precipitação caracterizada pela queda de pedaços irregulares de gelo, os quais normalmente medem entre 5 mm e 15 mm. Esse fenômeno está associado à formação de nuvens convectivas com intensos movimentos ascendentes e temperatura interna inferior a 0°C, as quais possibilitam a formação de grânulos de gelo em consequência do congelamento de gotículas de água.

Capone (2012 apud Éden e Twist, 1997) destaca que o processo de congelamento das gotículas de água que compõe as nuvens ocorre geralmente em torno de -25°C, formando núcleos de granizo. Esses núcleos se deslocam em diferentes altitudes das nuvens e são cobertos por uma camada de umidade que congela quando são deslocados novamente para o topo das nuvens, pelas correntes ascendentes, aumentando o tamanho dos núcleos. Sendo assim, o granizo é resultado da formação de várias camadas formadas pela trajetória dos núcleos de gelo através das nuvens.

Quando os grânulos de gelo tornam-se demasiadamente densos e as correntes ascendentes são incapazes de suportar o peso, estes precipitam na superfície em forma de granizo (GESSLER E PETTY, 2013).

3.2 CARACTERÍSTICAS DO GRANIZO

Segundo Gessler e Petty (2013), as propriedades físicas do granizo dependem do modo como são formadas as camadas de gelo que os constituem. Essas camadas podem crescer de forma seca ou úmida, indicando em qual região da nuvem o gelo se formou. As camadas opacas do granizo são formadas durante um processo de crescimento “seco” em uma região mais alta da nuvem, onde apresenta temperaturas muito baixas, fazendo com que as gotículas de água se congelem imediatamente quando em contato com o granizo formado. O congelamento instantâneo aprisiona bolhas de ar, as quais provocam a aparência mais leitosa à camada formada e as tornam menos densas.

As camadas claras se formam a partir de um processo de crescimento “úmido” em regiões mais baixas da nuvem com temperaturas suavemente superiores comparando com o crescimento seco. Nesse caso, as gotas de água congelam mais lentamente no granizo formado, permitindo que as bolhas de ar se deprendam e originando camadas claras e mais densas (GESSLER E PETTY, 2013). A Figura 1 ilustra as camadas opacas e claras que, geralmente, constituem o granizo.

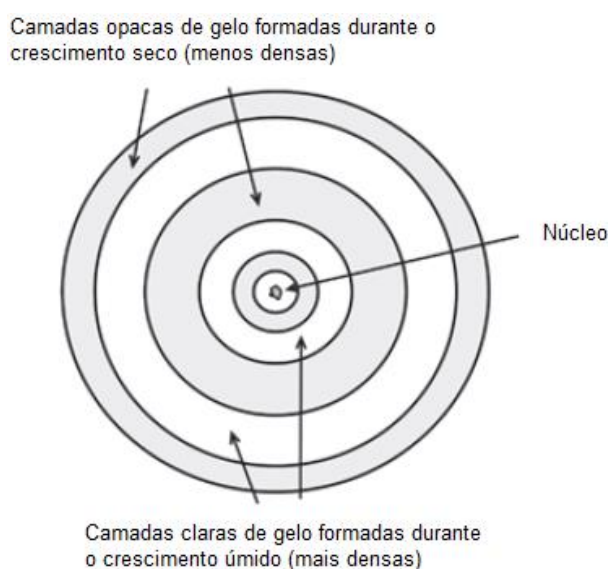


Figura 1 - Ilustração da seção transversal de um granizo.
Fonte: Adaptado de Gessler e Petty (2013).

De acordo com Gessler e Petty (2013), os fatores que determinam a forma e a densidade final do granizo são a quantidade de vezes que este se movimenta no interior das nuvens pelas correntes ascendentes e a altura das nuvens. As camadas opacas e claras determinam a dureza e a densidade dos granizos, isto é, a presença de camadas opacas (com bolhas de ar) tornam o granizo menos denso, e camadas claras (sem bolhas de ar) mais denso, podendo variar de 0.7 a 0.91 g/cm³.

Por outro lado, é possível que alguns granizos não tenham ou tenham poucas camadas de gelo, indicando que esse tipo de granizo é “equilibrado” por uma corrente ascendente e se forma a uma única altura na nuvem (GESSLER E PETTY, 2013).

Crenshaw e Koontz (2010) comparam os diferentes tamanhos de granizos já registrados com objetos circulares comuns no cotidiano das pessoas, como demonstrado na Tabela 1. O menor granizo registrado foi comparado ao tamanho de uma ervilha e os maiores à xícara de chá, toranja e *softball*.²

Tabela 1 – Comparação de tamanhos de granizo com objetos conhecidos.

Tamanho do Granizo		Descrição
(polegadas)	(centímetros)	
0,25	(0,6)	Ervilha
0,5	(1,3)	Bola de Naftalina
0,75	(1,9)	Moeda de 10 Centavos de Dólar
0,88	(2,2)	Níquel
1	(2,5)	Moeda de 25 Centavos de Dólar
1,25	(3,2)	Moeda de 50 Centavos de Dólar
1,5	(3,8)	Bola de Ping Pong
1,75	(4,5)	Bola de Golf
2	(5,1)	Ovo de Galinha
2,5	(6,3)	Bola de Tênis
2,75	(7,0)	Bola de Baseball
3	(7,6)	Xícara de Chá
4	(10,1)	Toranja
4,5	(11,4)	<i>Softball</i>

Fonte: Adaptado de Crenshaw e Koontz (2010)

² Forma modificada de beisebol jogado com bola mais macia e maior. Sem tradução para o Português. (Fonte: HOUAISS, A. Dicionário Inglês – Português. Rio de Janeiro: Record, 1982).

Gessler e Petty (2013) também afirmam que os granizos de tamanhos menores tendem a ter uma forma mais esférica, e à medida que aumentam de tamanho tornam-se mais irregulares. Isso ocorre devido ao fato de que os granizos maiores se formam nas regiões mais altas das nuvens, em tempestades de alta intensidade com grandes forças de elevação. Os núcleos de gelo formados nas regiões mais baixas da nuvem (região de congelamento úmido) são levados para as regiões do topo, mais frias, favorecendo a fusão dos núcleos de gelo, originando granizos maiores e irregulares.

3.3 DANOS CAUSADOS POR GRANIZO

Para Hutchinson e Koontz (2009) os danos por granizo aos telhados podem ser resultantes de diversos fatores:

1. Diâmetro do granizo;
2. Tipo de material de cobertura;
3. Idade da cobertura;
4. Eventual substrato sob a cobertura;
5. Temperatura da superfície no ponto de impacto.

3.3.1 Dano Funcional e Cosmético

Gessler e Petty (2013) estabelecem a relação entre dano cosmético e dano funcional a partir da queda de granizo. O dano funcional é aquele que afeta negativamente os recursos funcionais e operacionais ou o funcionamento do componente. No mercado de coberturas e seguros, o dano funcional a sistemas de cobertura é definido como uma redução na estanqueidade de água ou uma redução na vida em serviço do material.

Os danos que não se enquadrarem aos danos funcionais são considerados danos cosméticos, segundo Gessler e Petty (2013). Esse tipo de dano, normalmente, afeta somente a aparência ou o aspecto estético do componente, não

comprometendo sua vida útil. Os componentes afetados esteticamente só são substituídos quando o dano é realmente visível e/ou quando ocorre redução no valor das propriedades do material.

Segundo Marshall et. al. (2003), alguns dos problemas causados em coberturas são danos por umidade, os quais envolvem descamação superficial, delaminação, erosão e corrosão, os quais não devem ser inadvertidamente atribuídos ao granizo.

Para Crenshaw e Koontz (2000) existe um problema quanto à definição dos termos "resistência ao impacto" e "resistência ao granizo" e se estes são totalmente intercambiáveis. Outro desafio envolve testar vários materiais de cobertura e determinar se o impacto no sistema de telhado, com um projétil de aço ou plástico, produz um dano comparável ao dano provocado por granizo.

Segundo Gessler e Petty (2013) a resistência ao dano por impacto de um material é afetada por basicamente três fatores.

1. Quanto mais espesso o material, maior será a resistência ao impacto;
2. Quanto mais rígido o suporte subjacente, maior será a resistência ao impacto;
3. Quanto mais desgastado e deteriorado o material, menor será a resistência ao impacto.

Segundo Hutchinson e Koontz (2009), pesquisas anteriores demonstraram que os sistemas de cobertura exibem diferentes níveis de resistência ao impacto dependendo da temperatura da superfície.

Koontz (1991) ressalta que superfícies com temperaturas baixas, a cerca de 60°F (15,6°C), são muito mais propensas a fraturar do que as superfícies com temperaturas mais elevadas. Alguns materiais de cobertura, tais como telhas asfálticas e materiais poliméricos com temperatura de transição vítrea relativamente alta, podem se tornar frágeis em baixas temperaturas provocando uma diminuição na flexibilidade e capacidade de absorção da energia do impacto associada à queda de granizo (GESSLER E PETTY, 2013).

3.3.2 Estimativa da Criticidade do Granizo

Muitos estudos foram feitos nos Estados Unidos com o objetivo de simular os danos provocados por chuvas de granizo e avaliar o tamanho mínimo do granizo que pode causar dano funcional em sistemas de cobertura.

Crenshaw e Koontz (2000) buscaram desenvolver um método de ensaio para quantificar a resistência ao granizo dos sistemas de cobertura. Porém, tiveram dificuldade em identificar um método igualmente satisfatório para todos os materiais de cobertura e para as necessidades da indústria.

Organizações técnicas, tais como, *American Society for Testing and Materials (ASTM)*; *Canadian General Standards Board (CGSB)*; *European General Agreement Board (EGAB)*; *Factory Mutual Research Corporation (FMRC)*; *National Institute of Science and Technology (NIST)* e *Underwriters Laboratories (UL)*; desenvolveram métodos de ensaio de impacto utilizando projéteis de aço, plástico ou gelo (CRENSHAW E KOONTZ, 2000).

Os canadenses usaram dardos de aço para impactar alvos, geralmente à temperatura ambiente. Outras organizações, como a ASTM desenvolveram testes de impacto que usam dardos de aço, como por exemplo, a norma ASTM D 3746. Nos últimos anos, a maior atenção tem sido dada ao impacto com esferas de gelo (HUTCHINSON E KOONTZ, 2009).

Os métodos utilizando aço (projéteis, esferas ou dardos) de vários diâmetros consistem na queda de alturas pré-determinadas a fim de produzir impacto com a mesma energia cinética desempenhada por um granizo com o mesmo diâmetro (CRENSHAW E KOONTZ, 2000). Entretanto, salientam-se as limitações próprias desses testes e recomenda-se cautela na análise da efetiva resistência ao granizo dos materiais (GRAHAM, 2008).

Marshall et. al. (2003) testaram diferentes sistemas de cobertura, como telhas de argila, concreto, fibrocimento e fibrocimento com asbesto, utilizando esferas de gelo de diferentes tamanhos, impulsionadas através de um lançador mecânico especialmente projetado.

Segundo o autor citado acima, os materiais de cobertura apresentaram níveis diferentes de resistência ao impacto, por exemplo, para esferas de gelo de 1 polegada de diâmetro, nenhum dano foi registrado nos materiais. Foram

encontrados danos na maioria dos sistemas de cobertura quando submetidas a impactos com esferas de gelo maiores que 1,5 polegadas (MARSHALL et. al., 2003).

Baldini, Oliveira e Santos (2014) estudaram a resistência ao impacto por granizo de mantas asfálticas aplicadas a telhas. A metodologia usada pelos autores para determinar a resistência ao impacto por granizo das mantas foi utilizando esferas de aço de 1 polegada segundo a norma ABNT NBR 15575-5: 2013 Anexo C – Verificação da resistência ao impacto em telhados. As mantas desempenharam alta resistência ao impacto quando totalmente aderidas e moldadas nas telhas.

3.4 INTRODUÇÃO AOS FUNDAMENTOS DA MECÂNICA DO IMPACTO

O impacto é um fenômeno mecânico complexo que ocorre quando dois corpos colidem entre si durante um curto período de tempo, causando forças (impulsivas) de grande magnitude nos corpos (GILARDI; SHARF, 2002; HIBBELER, 2011). Sob impacto, uma série de fenômenos físicos bastante complexos se desenvolvem, como propagação de ondas elásticas, ondas de choque e ondas plásticas, perfuração, fratura, fragmentação e *spallation*³ (GILARDI; SHARF, 2002; QIAO, YANG E BOBARU, 2008). Os modelos analíticos para o estudo da mecânica do impacto podem ser distribuídos em quatro categorias: (i) modelos baseados na dinâmica dos corpos rígidos; (ii) modelos para a propagação de ondas de tensão em materiais perfeitamente elásticos; (iii) modelos para a propagação de ondas tensão através de sólidos que não são perfeitamente elásticos; e (iv) modelos não clássicos para a descrição de fenômenos como a fragmentação e *spallation*.

Nesta seção é apresentada uma introdução aos fundamentos da mecânica do impacto. Apesar das limitações do modelo de dinâmica de corpos rígidos, especialmente pela sua inabilidade para descrever tensões transientes, forças ou deformações produzidas durante a colisão entre dois corpos, este modelo será adotado neste trabalho por sua maior simplicidade.

Na dinâmica de corpos rígidos assume-se que quando uma força é aplicada a um ponto de um corpo, todos os pontos do corpo são colocados em movimento

³ *Spallation* é um termo que se refere ao processo no qual fragmentos de material são ejetados de um corpo devido a impacto ou tensão.

instantaneamente e que as distâncias relativas entre quaisquer dois pontos do material não se alteram (QIAO, YANG E BOBARU, 2008). Esta abordagem é baseada no princípio do momento e do impulso para corpos rígidos, com considerações relativas à restituição associada com fenômenos elásticos e inelásticos observados na prática.

Outra simplificação que será adotada é que na maioria das vezes os corpos serão representados por seus centros de massa, os quais serão então tomados como pontos materiais, ou seja, corpos materiais (com massa) nos quais as influências das dimensões sobre as características cinemáticas e dinâmicas do movimento podem ser desprezadas. Além disso, será considerado somente o impacto central, ou seja, aquele onde a direção do movimento dos centros de massa das duas partículas em colisão é a linha que passa pelos centros de massa e é perpendicular ao plano de contato.

Na discussão que se segue, baseada em KAMINSKI (2000), HIBBELER (2011) e MACAULAY (1987), são apresentados alguns fundamentos de dinâmica relevantes para a abordagem adotada.

3.4.1 Leis Fundamentais da Dinâmica

“Uma partícula livre da ação de forças permanecerá em repouso ou em movimento retilíneo uniforme” (**1ª lei de Newton ou lei da inércia**). Este fundamento depende de um referencial inercial, sendo que neste trabalho será adotado um referencial fixo à Terra⁴. A inércia pode ser entendida como a propriedade que o corpo tem de resistir a alterações em sua velocidade quando submetido à ação de forças. Uma medida quantitativa da inércia do corpo é a **massa (m)**, uma medida escalar, positiva e absoluta (não depende do referencial, nem do movimento).

“A taxa de variação da quantidade de movimento no tempo é proporcional à força que age num ponto material, tomados em relação a um referencial inercial” (**2ª lei de Newton**). **Quantidade de movimento (\vec{Q}) ou Momento Linear** é uma

⁴ O erro cometido ao se adotar a Terra como referencial inercial é da ordem de $0,02 \text{ m/s}^2$, o que para um corpo em queda livre significa uma diferença de aproximadamente 0,2%, desprezível no caso dos fenômenos estudados neste trabalho.

grandeza física definida como o produto da massa do ponto material por sua **velocidade** (\vec{v}): $\vec{Q}(t) = m\vec{v}(t)$. A forma mais usual de expressar a 2ª lei de Newton é $\vec{F} = m\vec{a}$ (onde \vec{a} é a aceleração) é um caso particular do enunciado mais geral, onde a massa é tomada como constante, o que é razoavelmente preciso para a maioria dos problemas de engenharia.

“A toda ação corresponde uma reação de mesma intensidade e direção com sentido contrário” (3ª lei de Newton).

3.4.2 Teoremas Gerais da Dinâmica do Ponto Material

“A variação total da quantidade de movimento linear de uma partícula entre dois instantes quaisquer é igual ao impulso das forças atuantes na partícula durante este intervalo de tempo” (**Teorema da Quantidade de Movimento Linear ou Princípio do Momento Linear e do Impulso**).

O **impulso de uma força** (\vec{I}) é uma grandeza física que mede a variação da quantidade de movimento de um corpo, provocada pela ação de uma força entre os instantes t_0 e t_f : $\vec{Q}(t_f) - \vec{Q}(t_0) = \int_{t_0}^{t_f} \vec{F} dt = \vec{I}(t_0, t_f)$.

“A variação da energia cinética do ponto material entre duas posições quaisquer do movimento é igual ao trabalho das forças atuantes na partícula durante este deslocamento” (**Teorema da Energia Cinética ou Princípio do Trabalho e Energia**).

A **energia cinética** (E_k) é um escalar definido como: $E_k = \frac{1}{2}mv^2$.

Pode-se concluir que o trabalho realizado por uma força constante é igual ao produto escalar da força pelo deslocamento do ponto material entre as posições final e inicial consideradas. No caso de um ponto material em queda livre, o trabalho realizado pela força peso é igual ao produto do peso do ponto material pela distância vertical percorrida pelo mesmo.

Energia potencial (E_p) é a energia que pode ser armazenada em um sistema físico e tem a capacidade de ser transformada em energia cinética.

“Durante o movimento de uma partícula, se somente forças conservativas⁵ realizam trabalho, a soma das energias cinética e potencial permanece constante” (**Princípio da conservação da energia**).

“Quando a soma dos impulsos externos agindo sobre a partícula é zero, o momento linear total permanece constante” (**Princípio da conservação do momento linear**). Uma característica útil do momento é que ele é sempre conservado (MACAULAY, 1987) num sistema mecanicamente isolado⁶. Assim, em um impacto observa-se (empiricamente) que o momento total dos corpos que colidem sempre se mantém constante (sistema mecanicamente isolado), embora individualmente o momento dos corpos possa variar, podendo ocorrer perda de energia do sistema.

3.4.3 Conservação de Energia Aplicada ao Granizo

Gessler e Petty (2013) afirmam que a lei da conservação da energia é o resultado de um total de energia associado a um sistema particular ou a um objeto, neste caso, o granizo. No momento de precipitação do granizo, a energia total (E_T) é um somatório de E_p e de E_k , resultando sempre no mesmo valor, a menos que a energia seja transferida para outro objeto. A aplicação da conservação de energia para o granizo é descrita na equação (1).

$$E_T = E_p + E_K = \text{Constante} \quad (1)$$

Onde:

E_T = Energia total;

E_p = Energia potencial;

E_k = Energia cinética.

A energia potencial (E_p) está relacionada com a massa (m_{gr}) do granizo, a altura (h) em relação ao substrato ou solo e a constante gravitacional (g), como observado na equação (2).

⁵ Forças conservativas são aquelas cujo trabalho total realizado depende apenas da posição inicial e final, ou seja, não depende da trajetória.

⁶ Um sistema mecanicamente isolado é justamente aquele em que o impulso total das forças externas sobre as partículas do sistema é nulo.

$$E_p = m_{gr} \cdot g \cdot h \quad (2)$$

Onde $g = 9,8 \text{ m/s}^2$.

A energia cinética (E_k) está associada ao movimento, relacionando a massa do granizo (m_{gr}) e a velocidade (v) a que se encontra, em qualquer intervalo de tempo (equação (3)).

$$E_k = \frac{1}{2} m_{gr} \cdot v^2 \quad (3)$$

Considerando a energia total do granizo segundo a Equação (1), quando o valor da altura (h) é zero, a energia potencial é nula, assim como, quando a velocidade do granizo (v) é zero, a energia cinética é nula. A constante gravitacional faz com que a velocidade do granizo aumente, e por consequência aumente o valor da energia cinética. O granizo atinge sua velocidade terminal (constante) quando a força de arrasto do ar diminui a velocidade do granizo, tornando a aceleração nula (GESSLER E PETTY, 2013).

Segundo Koontz (1991), a energia de impacto de um granizo varia de acordo com o tamanho, densidade e velocidade terminal. O tamanho do granizo pode variar de $\frac{1}{4}$ de polegada até 4,5 polegadas como demonstrado na Tabela 1, sendo altamente relacionado com a energia final de impacto ou energia cinética do granizo, ditando a ocorrência ou não de danos aos sistemas de coberturas residenciais ou industriais. A densidade do granizo também influencia na energia cinética final, portanto quanto mais denso, maior a probabilidade de causar danos.

3.4.4 Coeficiente de Restituição

Com o auxílio dos fundamentos apresentados, será construído um importante parâmetro de impacto. Nesse sentido, serão consideradas as seguintes premissas (HIBBELER, 2011), com o auxílio da Figura 2:

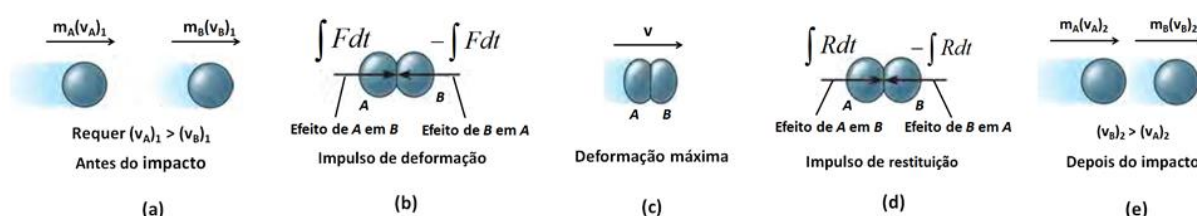


Figura 2 - Impacto central de duas partículas A e B.
Fonte: Adaptado de Hibbeler (2011).

As partículas A e B têm a quantidade de movimento inicial mostrada na Figura 2.a, onde $(v_A)_1 > (v_B)_1$.

Durante a colisão as partículas devem ser consideradas deformáveis (ou não rígidas). As partículas sofrerão um período de deformação, de tal forma que exerçam uma sobre a outra um impulso de deformação igual, mas oposto $\int F dt$ (Figura 2.b);

Apenas no instante da deformação máxima as duas partículas irão mover-se com uma velocidade comum v , visto que seu movimento relativo é zero (Figura 2.c);

Em seguida, ocorre um período de restituição, no qual as partículas retornam à sua forma original ou continuam deformadas permanentemente. O impulso de restituição igual, mas oposto ($\int R dt$) empurra as partículas para longe uma da outra (Figura 2.d). Na realidade, as propriedades físicas de quaisquer dois corpos são tais que o impulso de deformação sempre será maior que do que aquele de restituição, ou seja, $\int F dt > \int R dt$;

Logo após a separação, as partículas terão quantidade de movimento final mostrada na Figura 2.e, onde $(v_B)_2 > (v_A)_2$.

Aplicando-se o princípio da conservação da quantidade de movimento, visto que durante a colisão os impulsos internos de deformação e restituição cancelam-se, resulta-se na equação (4).

$$m_A(v_A)_1 + m_B(v_B)_1 = m_A(v_A)_2 + m_B(v_B)_2 \quad (4)$$

Por outro lado, aplicando-se o princípio do impulso e quantidade de movimento a cada partícula, nas fases de deformação e de restituição, obtemos os

resultados apresentados na Tabela 2, onde se define o coeficiente de restituição e como a razão entre o impulso de restituição e o impulso de deformação:

Tabela 2 – Expressões de deformação e restituição para partículas A e B.

Partícula	Fase de Deformação	Fase de Restituição
A	$m_A(v_A)_1 - \int Fdt = m_A v$	$m_A v - \int Rdt = m_A(v_A)_2$
	$e = \frac{\int Rdt}{\int Fdt} = \frac{v - (v_A)_2}{(v_A)_1 - v}$	
B	$m_B(v_B)_1 + \int Fdt = m_B v$	$m_B v + \int Rdt = m_B(v_B)_2$
	$e = \frac{\int Rdt}{\int Fdt} = \frac{(v_B)_2 - v}{v - (v_B)_1}$	

Fonte: Adaptado de Hibbeler (2011).

Fazendo-se a composição das duas expressões da Tabela 2, o coeficiente de restituição pode ser expresso em termos das velocidades iniciais e finais das partículas (equação (5)).

$$e = \frac{(v_B)_2 - (v_A)_2}{(v_A)_1 - (v_B)_1} \quad (5)$$

Gessler e Petty (2013) adequam a equação (6) ao caso de impacto de granizo contra superfícies de coberturas, como a simples razão entre a velocidade do granizo antes (v_1) e depois do impacto (v_2):

$$e = \frac{v_2}{v_1} \quad (6)$$

Segundo Gessler e Petty (2013), a gravidade dos danos causados pelo impacto da queda de granizo a objetos depende de dois fatores principais:

1. A quantidade de energia cinética que o granizo possui no momento do impacto;
2. A fração de energia que é efetivamente transferida para o objeto impactado.

Para valores de e iguais a 1, segundo Hibbeler (2011), considera-se o impacto elástico, ou seja, a colisão entre as partículas é totalmente elástica, em que o impulso de deformação será igual ao impulso de restituição, embora isso jamais possa ser obtido para um colisão elástica.

Para esta condição, a velocidade do granizo antes e depois do impacto é a mesma, e somente a direção do granizo é invertida, portanto nenhuma energia seria transferida para o objeto impactado (GESSLER E PETTY, 2013). Esta situação não é esperada já que o granizo geralmente quebra e transfere a maior parte da energia para o objeto atingido (por exemplo, uma telha de residência).

Para valores de e iguais a zero, considera-se o impacto plástico, quando não há impulso de restituição, de modo que ambas as partículas acoplam-se ou aderem-se após a colisão, e passam a mover-se a uma velocidade comum (HIBBELER, 2011).

Gessler e Petty (2013) ressaltam ainda que essa condição indica que a velocidade relativa do granizo após o impacto é zero, sugerindo que toda a energia cinética foi transferida ao objeto impactado ou absorvida pelo próprio granizo. Em situações reais de impacto por granizo, o coeficiente de restituição é muito mais próximo de zero do que de um.

Originalmente pensava-se que o coeficiente de restituição fosse uma consistente propriedade de um material (MACAULAY, 1987). Atualmente reconhece-se que o coeficiente de restituição depende de muitos fatores, como a geometria dos corpos em contato, da velocidade, das propriedades dos materiais, da duração do contato e, possivelmente, do atrito (GILARDI; SHARF, 2002; MACAULAY, 1987).

Considerando os métodos adotados neste trabalho, entretanto, se considerarmos a esfera de aço como um corpo perfeitamente rígido, o coeficiente de restituição pode ser visto como uma medida da habilidade do material/substrato que recebe o impacto de transferir a energia (GOLDSMITH, 2001).

3.4.5 Velocidade Terminal do Granizo

De acordo com Crenshaw e Koontz (2010), as velocidades terminais e as energias (cinética) de impacto relacionadas a diferentes tamanhos de granizo foram

calculadas por Laurie, J. A. P. (1960). Laurie utilizou um mecanismo aerodinâmico e esferas de gelo lisas e regulares para obter os resultados demonstrados na Tabela 3.

Os dados indicam que os valores de velocidade terminal aumentam conforme o aumento do diâmetro dos granizos. Um fator chave no dano provocado pelo granizo é a quantidade de energia de impacto que incide sobre a superfície do telhado (HUTCHINSON E KOONTZ, 2009).

Tabela 3 – Velocidade terminal e energia de impacto aproximada de granizos.

Diâmetro		Velocidade Terminal			Energia de Impacto Aproximada	
<i>Polegadas</i>	<i>cm</i>	<i>pés/s</i>	<i>Milha/hora (mph)</i>	<i>m/s</i>	<i>pés-lb</i>	<i>Joules</i>
1	(2.5)	73	50	22,3	<1	<1,36
1,25	(3.2)	82	56	25,0	4	5,42
1,5	(3.8)	90	61	27,4	8	10,85
1,75	(4.5)	97	66	29,6	14	18,96
2	(5.1)	105	72	32,0	22	29,80
2,5	(6.4)	117	80	35,7	53	71,90
2,75	(7.0)	124	85	37,8	81	109,8
3	(7.6)	130	88	39,6	120	162,7

Fonte: Adaptado de Crenshaw e Koontz (2010) apud Laurie (1960).

Gessler e Petty (2013) ressaltam que os resultados obtidos por Laurie (1960) são conservadores, já que geralmente os granizos não são perfeitamente regulares e esféricos. Afirmam que um granizo mais áspero e de forma irregular, teoricamente, aumentaria o arrasto e, por consequência, atingiria uma velocidade terminal menor, com menos energia de impacto do que a associada a um granizo liso e perfeitamente esférico.

Os cálculos de energia de impacto realizados por Laurie (1960) consideraram a velocidade terminal do granizo como sendo sua velocidade vertical, em queda livre, porém o granizo geralmente não cai em linha reta, mas sim conta com a ação do vento, tendo uma componente de vento horizontal (GESSLER E PETTY, 2013). Sendo assim a energia associada à queda de granizos reais deve ser aproximada pela combinação da queda livre (vertical) e a velocidade do vento (horizontal).

3.5 MATERIAIS DE COBERTURA/TELHADOS

Segundo Koontz (1991) os materiais de cobertura estão sujeitos a diferentes variações climáticas, incluindo radiação ultravioleta, calor, vento, chuva, poluentes e granizo. Os danos por granizo resultam em benefícios para os produtores de materiais de cobertura, porém tem sido muito dispendioso para as seguradoras e consumidores.

O granizo pode afetar vários tipos de materiais usados em coberturas, tanto comerciais quanto residenciais. Os telhados podem ser produzidos com uma grande variedade de materiais, como cerâmica, pedra, cimento, fibrocimento, metal, vidro, plástico, madeira e outros (LEROY MERLIN, 2014)⁷.

As telhas cerâmicas são as mais antigas e mais utilizadas em residências. Esse tipo de telha proporciona uma ótima barreira térmica para a construção, deixando o ambiente interno com temperatura inferior ao externo. As telhas cerâmicas podem variar de acordo com o tipo de encaixe, rendimento por metro quadrado e inclinação.

Outro tipo de telha com vasta utilização em construções é a telha de fibrocimento, considerada a telha que apresenta melhor custo/benefício. São leves e resistentes, necessitando de um engradamento de telhado mais simples e exigem boa fixação. Essas telhas possuem espessuras variadas, podendo ser de 4mm, 5mm, 6mm e 8mm, com dimensões de aproximadamente 1,10m de largura X 2,44m de comprimento, dependendo do fabricante.

As telhas de materiais poliméricos mais comuns são as telhas de politereftalato de etileno (PET) e telhas de Polipropileno (PP). As telhas de PET são eficientes, com excelente propriedade de fluxo luminoso, brilho e transparência, além de excelente relação custo/benefício. As telhas de PP são fabricadas a partir da composição de resinas termoplásticas especiais, favorecendo a luminosidade natural do ambiente. Como opção de telha metálica, estão disponíveis no mercado,

⁷ A maior parte das informações de natureza comercial desta seção foi obtida na página da internet da Leroy Merlin (www.leroymerlin.com.br). As páginas de outras empresas comerciais do setor também foram consultadas, mas a autora entende ser dispensável uma extensiva listagem, uma vez que as informações disponíveis tem a mesma amplitude.

as telhas de aço galvanizado, sendo resistentes e leves, apresentarem facilidade na instalação, além de possuírem ótima relação custo/benefício.

Fazendo-se uma escala de custos das telhas de diferentes materiais, as telhas cerâmicas são consideradas telhas de alto custo, enquanto que as telhas de metal (aço), telhas de concreto e telhas de plástico apresentam custo moderado (QUARTOS, 2015). A telha de menor custo é a telha de fibrocimento, por isso, muito utilizada nas moradias populares.

Quanto ao aspecto do comportamento mecânico típico desses materiais, sabe-se que os materiais cerâmicos não apresentam deformação plástica apreciável e sua resistência ao impacto é reduzida, ou seja, as cerâmicas apresentam baixa tenacidade (ZANOTTO, 1991). Por outro lado, os materiais metálicos apresentam alta ductilidade e elevada resistência mecânica. O fibrocimento, por sua vez, é feito a partir de uma matriz cimentícia reforçada com fibras minerais, vegetais ou sintéticas, misturados com aglomerantes e cargas minerais. Essas fibras tem a função de aumentar a resistência mecânica e a capacidade de absorção de energia do material.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados nos laboratórios do Departamento de Engenharia de Materiais do Campus Londrina, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Os métodos de ensaio adotados neste trabalho foram baseados nas normas brasileiras:

1. ABNT NBR 15575-5_2013 Edificações habitacionais – Desempenho, Parte 5: Requisitos para sistemas de coberturas – Anexo C (Verificação da resistência ao impacto em telhados – Método de ensaio).
2. ABNT NBR 13818_1997 Placas Cerâmicas para Revestimento – Especificação e Métodos de Ensaio - Anexo Q (Determinação da resistência ao impacto).
3. ABNT NBR 15310_2005 Componentes Cerâmicos – Telhas – Terminologia, requisitos e métodos de ensaio – Anexo C (Carga de ruptura à flexão simples (FR) – Flexão a três pontos).

4.1 NBR 15575-5 (ANEXO C) – VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO

4.1.1 Materiais e Equipamentos

Os materiais estudados neste trabalho foram telhas de cerâmica vermelha do tipo romana, telhas de fibrocimento com 4mm de espessura e telhas de aço galvanizado. As telhas foram adquiridas em casas comerciais de materiais para construção.

Para este ensaio, segundo a norma NBR 15575-5 – Anexo C, foram necessários caibros de madeira para a preparação dos apoios dos corpos-de-prova (telhas), bem como elementos de fixação (parafusos, pregos) para a construção de um pano de telhas.

Como elemento percussor de impacto será utilizado uma esfera de aço cromo-vanádio, maciça e com diâmetro de uma polegada.

O ensaio foi realizado com o auxílio de tubos guias de diferentes comprimentos (1m, 2m e 3m), com um eletroímã acoplado ligado a uma Fonte elétrica, construído no laboratório de Apoio e Preparação do Departamento de Engenharia de Materiais da UTFPR – Campus Londrina. A figura 3 abaixo representa o eletroímã utilizado.



Figura 3 – Eletro-ímã utilizado no ensaio NBR15575 - Anexo C.

Usou-se uma lupa para a visualização da ocorrência de danos nas amostras, quando os danos não foram visíveis a olho nu, bem como uma máquina fotográfica para o registro dos danos ocorridos.

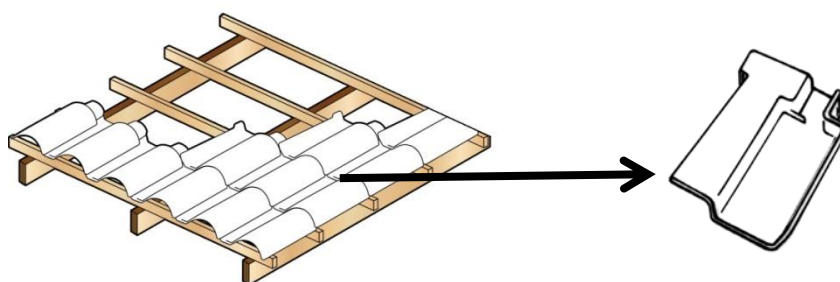
4.1.2 Preparação das Amostras

Para a verificação da resistência ao impacto, os corpos-de-prova foram as próprias telhas fornecidas pelo fabricante.

As amostras de telhas cerâmicas do tipo romana foram dispostas formando um pano⁸ de cinco telhas (5x5), conforme especificado na norma. As telhas foram apoiadas em uma estrutura feita com caibros de madeira, simulando sistemas de telhados convencionais, ilustrado na Figura 4 e Figura 5 (a).

O pano de telhas de fibrocimento, representado na Figura 5 (b), contém apenas uma telha devido a sua maior dimensão. As regiões impactadas estão indicadas pelas setas nas Figuras 5 (a) e (b).

⁸ Conjunto de telhas dispostas uniformemente formando um sistema de telhado.



**Figura 4 – Representação do pano de telhas cerâmicas com apoios de madeira (a) e modelo de telha cerâmica romana (b).
Fonte: Adaptado de Telhas Polla.**



Figura 5 – Ilustração dos panos de telhas cerâmicas (a) e telha de fibrocimento (b). As setas indicam as regiões das telhas onde foram impostos os impactos com esfera de aço.

4.1.3 Procedimento de Ensaio

O ensaio consistiu em submeter uma amostra representativa de material de cobertura aos impactos de uma esfera de aço maciça com diâmetro de uma polegada, em queda livre e com diferentes energias de impacto. A esfera foi fixada no eletroímã e lançada através de um tubo-guia graduado, o qual foi posicionado no centro das telhas, conforme apresentado na Figura 6.

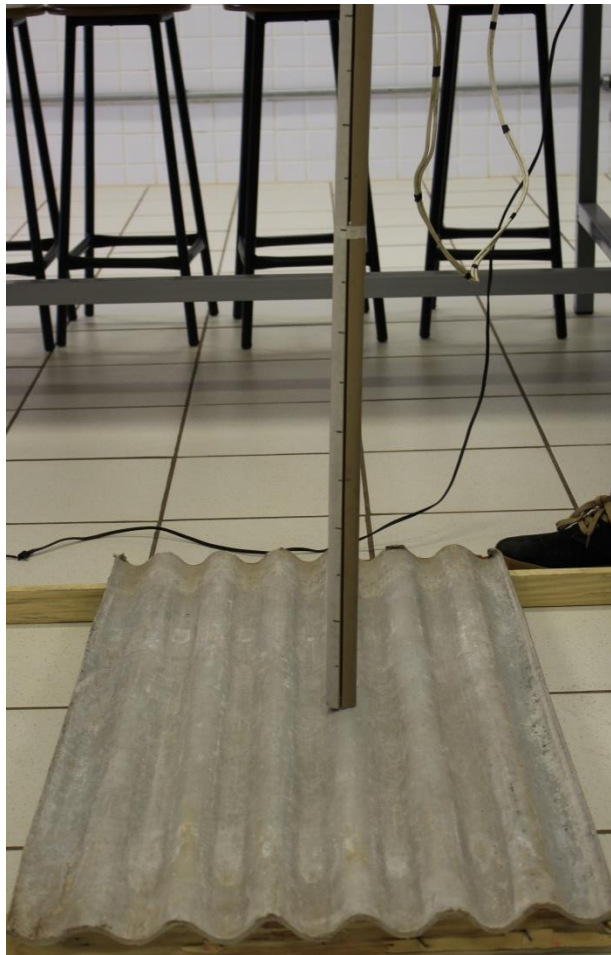


Figura 6 – Aparato experimental utilizado para ensaio de acordo com a norma NBR 15575-5, composto por tubo-guia graduado com eletroímã acoplado e esfera de aço de 1 polegada.

Considerando a norma, o impacto foi aplicado na posição mais desfavorável no componente do sistema de cobertura. Considerando os materiais ensaiados, os impactos foram aplicados na região central da telha conforme a seta indicada na Figura 7.

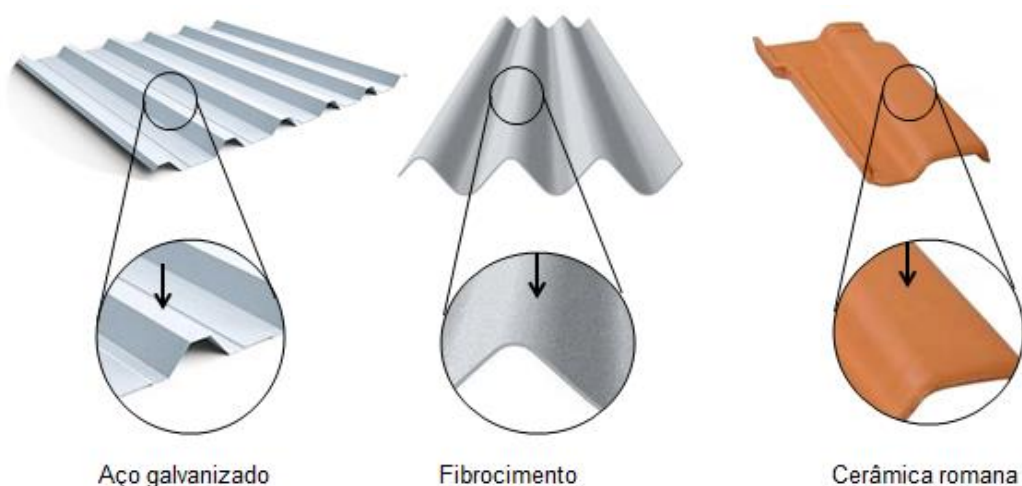


Figura 7 – Regiões de incidência da esfera de aço nos materiais de cobertura.

As condições de ensaio estabelecidas pela norma, relativas à massa da esfera maciça (m), altura da queda (h) e energia de impacto (E) estão indicadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Condições de ensaio de resistência ao impacto de sistemas de cobertura.

Percussor de Impacto	Massa (m) [g]	Altura (h) [m]	Energia de Impacto (E) [J]
Esfera de aço maciça	65,6	1,50	1,0
		2,30	1,5
		3,80	2,5

Fonte: ABNT NBR 15575-5 – Anexo C (2013).

Entretanto, neste trabalho adotaram-se, além das condições recomendadas pela norma, outras alturas de lançamento a fim de obter uma melhor graduação dos danos ocorridos pela queda da esfera de aço. Para cada altura, a esfera foi lançada em seis amostras de telhas, localizadas no centro do pano, e foi imposto um único impacto na região central de cada amostra. As condições adotadas estão registradas na tabela 5.

Tabela 5 – Condições de ensaio adotadas para lançamento do percussor de impacto.

Percussor de Impacto	Massa (m) [g]	Altura (H) [m]	Energia de Impacto (E) [J]	Qtd. de amostras
Esfera de aço maciça	65,6	0,5	0,32	6
		1,0	0,64	6
		1,5	0,96	6
		2,0	1,29	6
		2,5	1,61	6
		3,0	1,93	6

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15575-5 – Anexo C (2013).

Essas alturas foram escolhidas arbitrariamente a partir das energias de impacto estabelecidas pela norma e de forma a graduar os efeitos. A tabela 3 (LAURIE, 1960), a qual relaciona o diâmetro do granizo com sua velocidade terminal e energia de impacto incidente, não cobre os valores de energia associadas às alturas inferiores a 2 metros adotadas neste trabalho.

De forma a se poder relacionar os valores de energia de impacto adotados neste trabalho com o diâmetro médio estimado do granizo, optou-se por plotar um gráfico dos dados da tabela 3 e observar o comportamento desses dados. A Figura 8 representa graficamente os dados da tabela 3, podendo-se notar uma relação funcional do tipo relação de potência entre o diâmetro do granizo e a energia cinética da partícula em regime estacionário. A partir desta relação funcional, estimaram-se os valores de energia associados com diâmetros menores que uma polegada, que são apresentados na tabela 6, onde os valores destacados (em negrito) são os dados obtidos para este trabalho, com energias de impacto inferiores a 1,36J.

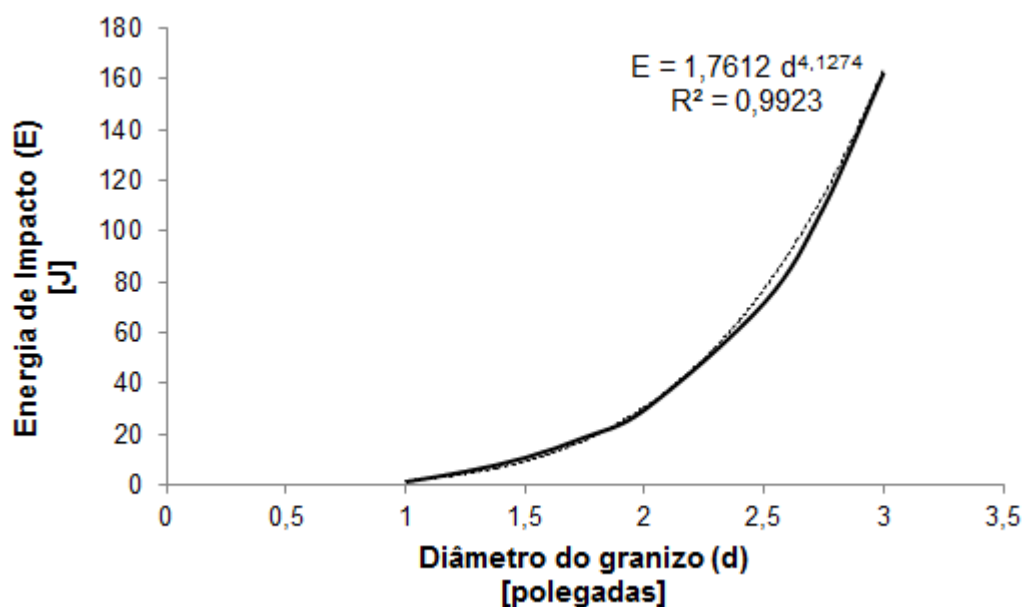


Figura 8 – Curva energia de impacto (E) versus Diâmetro do granizo (d) para os dados apresentados na tabela 3 (LAURIE (1960)).

Tabela 6 – Diâmetro do granizo e sua respectiva energia de impacto aproximada considerando dados da tabela 3.

Diâmetro do granizo (polegadas)	Energia de Impacto Aproximada (J)
0,66	0,32
0,78	0,64
0,86	0,96
0,93	1,29
1	1,36
1,25	5,42
1,5	10,85
1,75	18,96
2	29,8
2,5	71,9
2,75	109,8
3	162,7

Fonte: Adaptado de Crenshaw e Koontz (2010) apud Laurie (1960).

Como segunda etapa do ensaio, foram impactadas mais seis telhas com três lançamentos consecutivos a 2 metros, impactando a região central das mesmas.

Com o auxílio de uma máquina fotográfica registrou-se a ocorrência de fissuras, lascamentos, desagregações, transpassamentos ou outras avarias.

Segundo os critérios estabelecidos pela norma NBR 15575-5, o material não deve sofrer ruptura ou transpassamentos em face da aplicação de impacto com energia igual a 1,0 J, sendo tolerada a ocorrência de falhas superficiais, como fissuras, lascamentos e outros danos que não impliquem na perda de estanqueidade do telhado⁹.

A norma não estabelece uma classificação ou graduação quanto ao tipo de dano ocorrido no material, portanto foram feitas algumas considerações com base na norma ASTM D3746-85 “Standard Test Method for Impact Resistance of Bituminous Roofing Systems”. Apesar de esta norma ser específica para sistemas de cobertura betuminosos, o método de avaliação de dano proposto foi aplicado a cada amostra de acordo com a Tabela 6.

Tabela 7 – Classificação do tipo de dano ocorrido.

Tipo de Dano	Definição
0	Não ocorrência de dano
2	Somente endentações e/ou entalhes
4	Trincas, rachaduras e/ou divisões

Fonte: Adaptado de ASTM D3746-85 (2015).

Para melhor observação dos danos ocorridos nas telhas cerâmicas, optou-se por submergir as telhas em água, a qual funcionou como um líquido penetrante, para evidenciar possíveis marcas de impacto, trincas, entalhes, entre outros, imperceptíveis a olho nu.

⁹ Neste trabalho adotou-se o critério de estanqueidade/impermeabilidade previsto na norma NBR 15575-5 item 10. Atualmente, não há aparato disponível nos laboratórios do curso de Engenharia de Materiais, para a realização de testes de impermeabilidade conforme a norma NBR 15310 - Anexo B.

4.2 NBR 13818 (ANEXO Q) – DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO

4.2.1 Materiais e Equipamentos

Telhas cerâmicas romana e telhas de fibrocimento com espessura de 6mm foram utilizadas para o ensaio segundo a norma NBR 13818, as quais foram cortadas no formato de placas planas com dimensões 75mm X 75mm, com o auxílio de uma serra (Makita).

Neste ensaio, blocos de concreto foram utilizados como substrato padrão para as amostras.

A mesma esfera de aço cromo-vanádio com diâmetro de 1 polegada foi utilizada como percussor de impacto.

Uma máquina filmadora *CANON EOS Rebel T5i* também foi necessária para filmar os ensaios, registrando a trajetória da esfera e posterior análise no software livre *TRACKER*, instalado em um micro computador.

4.2.2 Preparação dos Corpos-de-prova

Neste ensaio, as telhas foram cortadas nas regiões mais planas e regulares, resultando em corpos-de-prova com dimensões de 75 mm X 75 mm, como especificado na norma para determinação de resistência ao impacto. Os corpos-de-prova foram colocados sobre os blocos de concreto e colados de forma que o centro da placa coincidissem com o centro do bloco, conforme Figura 9.

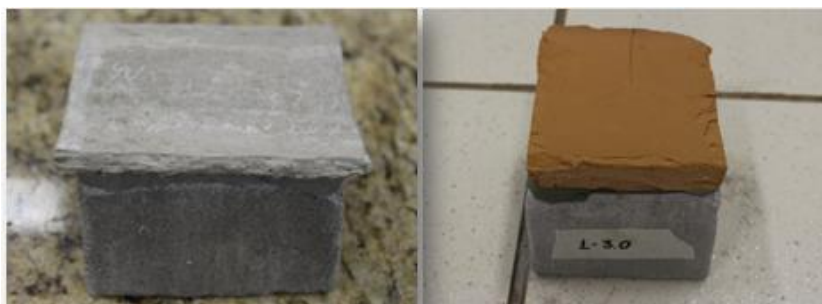


Figura 9 – Corpos-de-prova de fibrocimento (4mm) e de cerâmica romana colados em bloco de concreto conforme NBR 13818.

A norma NBR 13818 – Anexo Q recomenda que a preparação dos blocos de concreto seja de acordo a NBR 7215, porém neste trabalho optou-se por adotar meios mais práticos de fabricação dos blocos utilizando-se uma massa pronta de concreto da marca *Votoram*.

Construiu-se moldes de madeira com dimensões de 75 mm x 75 mm x 50 mm, apresentados na Figura 10, e foram vedados com silicone para evitar o vazamento da massa de concreto.



Figura 10 – Ilustração dos moldes de madeira utilizados na preparação dos blocos de concreto.

A massa concreto e a água foram misturados em uma relação água/pó(massa) de $\frac{1}{4}$ com o auxílio de uma espátula, por aproximadamente 2 minutos, até que a massa ficasse homogênea. Em seguida aplicou-se um desmoldante nos moldes e a massa de concreto foi vertida. Os blocos de concreto foram desmoldados após 72 horas e hidratados com jatos de água.

4.2.3 Procedimento de Ensaio

A norma NBR 13818 - Anexo Q emprega o conceito de coeficiente de restituição para avaliar a resistência ao impacto de pisos cerâmicos. Entretanto, neste trabalho a aplicação desta norma foi estendida aos demais materiais estudados, de forma a se obterem resultados comparáveis, uma vez que foi utilizado o mesmo tipo de base (bloco de concreto) para as amostras.

A aparelhagem utilizada no ensaio está ilustrada na Figura 11, a qual é uma adaptação da aparelhagem especificada na norma.

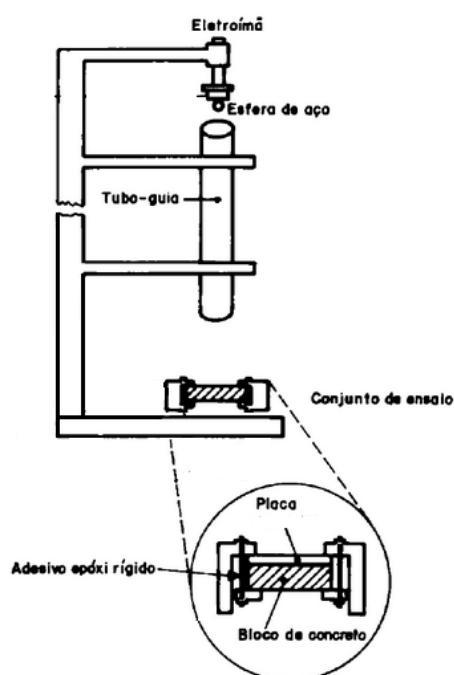


Figura 11 – Ilustração do aparato para a determinação do coeficiente de restituição.
Fonte: Adaptado de NBR 13818 (1997).

O corpo-de-prova foi posicionado na direção do eletroímã, de modo que a esfera caísse exatamente no centro da placa. Foram testados inicialmente 20 corpos-de-prova de telha cerâmica romana. Embora esta norma especifique a altura de 1 metro de queda livre, as energias de impacto foram variadas para alturas de

lançamento de 1m, 1,5m, 2m e 3m. Apenas 5 corpos-de-prova de fibrocimento foram testados a partir de uma altura de 2m.

O coeficiente de restituição foi obtido a partir da altura de restituição da esfera, isto é, a altura máxima atingida pela esfera após o impacto com o corpo-de-prova. Os valores das alturas de restituição da esfera foram obtidos a partir da análise dos vídeos feitos durante o ensaio. E o cálculo do coeficiente de restituição de cada material foi obtido a partir da média dos resultados da respectiva série de amostras, para cada altura de lançamento.

4.2.4 Vídeo Análise

O *software TRACKER* foi utilizado para as análises do movimento da esfera em queda livre no momento da colisão e após a colisão com a amostra. Segundo Meucci (2014) o *TRACKER* possui ferramentas de vídeo análise e de modelagem que permitem criar modelos baseados em cinemática ou nas leis de Newton e comparar o desenvolvimento do modelo com fenômenos da realidade. Os modelos deste *software* podem ser sincronizados com as informações contidas no vídeo, permitindo testar os modelos diretamente por inspeção visual.

O *software TRACKER* permitiu a obtenção de dados espaciais e temporais referentes à trajetória da esfera, por meio da aplicação da vídeo análise. A partir dos valores das alturas atingidas pela esfera (alturas de restituição), registradas pelo *software*, tornou-se possível a obtenção das velocidades instantâneas, imediatamente antes do impacto (v_1) e imediatamente após o impacto (v_2) com a amostra.

Segundo as equações de cinemática de uma partícula (HIBBELER, 2011), as velocidades podem ser calculadas a partir da equação de Torricelli para movimento em queda livre, descrita na equação (7).

Desprezando-se a resistência do ar, a aceleração direcionada para baixo quando o corpo está próximo do solo é constante e de aproximadamente $9,81 \text{ m/s}^2$ (HIBBELER, 2011).

$$v_f^2 = v_0^2 + 2 \cdot g \cdot \Delta y \quad (7)$$

Para a primeira trajetória da esfera (anterior ao impacto), considera-se que:

$$v_1^2 = v_0^2 + 2 \cdot g \cdot \Delta y \quad (8)$$

onde v_1 é a velocidade anterior ao impacto da esfera com a amostra;

v_0 é a velocidade inicial ou de repouso;

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$;

Δy é a altura inicial da esfera.

Para a segunda trajetória da esfera (após o impacto), obtém-se a equação (9).

$$v_f^2 = v_2^2 - 2 \cdot g \cdot \Delta y \quad (9)$$

onde v_f é a velocidade final (nula) da esfera após completar a trajetória;

v_2 é a velocidade após o impacto da esfera com a amostra;

Δy é a altura atingida pela esfera após impactar a amostra (altura de restituição).

Sendo assim, o coeficiente de restituição (e) dos materiais foi calculado a partir do valor obtido da velocidade instantânea anterior (v_1) e posterior ao impacto (v_2) das esferas de aço com as amostras. O cálculo foi feito a partir da equação (6)

$e = \frac{v_2}{v_1}$, desconsiderando atrito, ruídos e fenômenos de propagação de ondas de

choque durante o impacto.

4.3 NBR 15310 (ANEXO C) – CARGA DE RUPTURA À FLEXÃO

A norma NBR 15310_2005 – Anexo C foi abordada com o objetivo de complementar a análise do comportamento mecânico dos materiais de cobertura, especificamente das telhas cerâmicas, verificando a carga de ruptura à flexão simples. A determinação da carga de ruptura à flexão simples (flexão a três pontos ou ensaio dos três cutelos) tem por finalidade simular situações genéricas no

transporte, no uso, na construção e manutenção das telhas (ABNT NBR 15310, 2005).

4.3.1 Materiais e Equipamentos

Os materiais utilizados foram telhas cerâmicas compostas de encaixe do modelo romana, previamente testadas pela norma NBR 15575-5 – Anexo C (Seção 4.1) de acordo com a tabela 5.

Foram testadas seis unidades de telhas cerâmicas para cada nível de lançamento da esfera (0,5m, 1m, 1,5m, 2m, 2,5m, 3m) de aço e mais seis unidades de telhas utilizadas como fornecidas pelo fabricante, não impactadas com a esfera de aço, totalizando 42 amostras de telhas para o ensaio de flexão simples.

O dispositivo para o ensaio de flexão simples foi construído a partir de adaptações do dispositivo proposto pela norma NBR 15310 – Anexo C, representado na Figura 12.

Neste trabalho, as bases de apoio e o cutelo superior foram fabricados em laboratório, a partir do recorte de placas de seção transversal retangular de madeira dura. Tiras de borracha foram coladas nas interfaces das bases/cutelo com o corpo-de-prova.

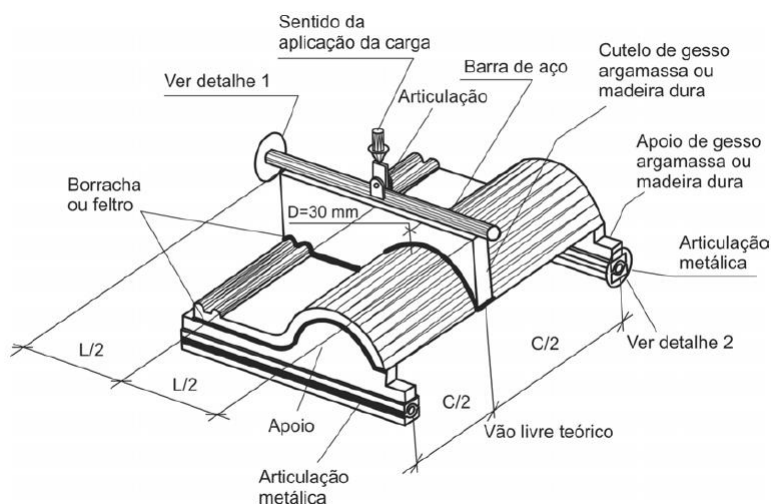


Figura 12 – Dispositivo para aplicação de carga para telha composta de encaixe.

Fonte: ABNT NBR 15310 – Anexo C (2005).

O ensaio de flexão simples foi feito com o auxílio de uma Máquina Universal de Ensaio modelo AROTEC WDW – 100E com aplicação da carga a 1mm/minuto.

4.3.2 Preparação dos Corpos-de-Prova

Primeiramente, as telhas foram identificadas e limpas, em seguida foram imersos em água à temperatura ambiente por 24 horas, antes do ensaio. Após esse período foram removidos e retirado o excesso de água com o auxílio de um pano limpo e úmido.

4.3.3 Procedimento de Ensaio

A telha a ser testada foi assentada sobre os apoios inferiores, de modo que as bases de apoio ficassem posicionadas a uma distância de 30 cm uma da outra e o cutelo (apoio superior) foi posicionado no centro da telha. Barras de aço de foram apoiadas aos apoios inferiores e cutelo conforme ilustrado na Figura 13.

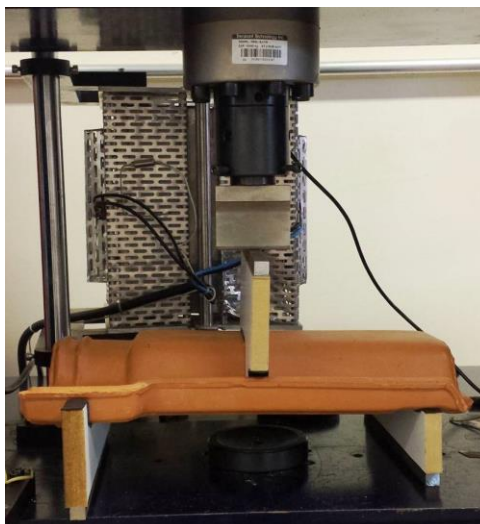


Figura 13 – Ilustração do dispositivo para ensaio de flexão simples em telhas cerâmicas do tipo romana.

O sistema constituído por apoios e corpo-de-prova (telha), foi colocado no equipamento de aplicação de carga, de modo que a barra de aplicação de carga ficasse alinhada paralelamente aos apoios, em um ponto equidistante de ambos, para aplicar a carga em ponto correspondente à metade da largura da telha.

A carga foi aplicada a uma velocidade constante de 1 mm/min, o que correspondeu aproximadamente à taxa de carregando determinada pela norma, até a ruptura do corpo-de-prova. O valor da carga máxima de ruptura de cada corpo-de-prova foi registrado e determinou-se a carga média de ruptura dos corpos-de-prova.

4.4 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS

Para fins de comparação, os resultados dos testes de resistência ao impacto, conforme a NBR 13818, e de resistência à flexão, conforme NBR 15310, foram organizados em séries, variando-se a altura/energia do impacto e o número de impactos, conforme o caso.

Para cada série foram calculados a média e o desvio padrão, da forma convencional (COSTA NETO, 1977), e foram determinados os intervalos de confiança para a média, com 95% de confiança. As séries foram comparadas por meio da realização de alguns testes estatísticos específicos, assumindo-se que os resultados são normalmente distribuídos e independentes.

Para a comparação das variâncias utilizou-se o Teste de Bartlett (COSTA NETO, 1977). Este teste se baseia no cálculo de uma estatística de teste χ^2_{k-1} , onde k é o número de séries comparadas, a qual, sob a hipótese de igualdade das variâncias (condição de homocedastividade), tem aproximadamente distribuição de qui-quadrado com $k-1$ graus de liberdade. A hipótese nula (ou seja, de igualdade das variâncias), H_0 , é rejeitada quando o valor da estatística de teste é maior que um valor crítico para o mesmo número de graus de liberdade, geralmente obtido em tabelas, dado o nível de significância desejado. O teste é unilateral à direita. Nos testes realizados o nível de significância adotado foi de 5%.

A análise de variância (ANOVA) foi a técnica estatística empregada para comparação das médias das séries (COSTA NETO, 1977). A hipótese nula, H_0 , de

igualdade das médias, é rejeitada quando o valor da estatística teste (F_{teste}) calculado é maior que o valor teórico crítico da distribuição F de Snedecor, considerando-se o nível de significância estabelecido (5%, unilateral à direita) e os graus de liberdade (função do número de séries comparadas e do número de amostras de cada série).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 TELHA CERÂMICA

5.1.1 Resultados de Acordo com a Norma NBR 15575 – Anexo C

Segundo a norma NBR 15575-5 o telhado, quando sob a ação de impactos de corpo-rígido, não deve sofrer ruptura ou traspassamento em face da aplicação de impacto com energia igual a 1,0 J, sendo tolerada a ocorrência de falhas superficiais, tais como, fissuras, lascamentos e outros danos, os quais não impliquem na perda de estanqueidade do telhado.

Sendo assim, a tabela 8 abaixo estabelece uma relação entre as alturas de lançamento da esfera de aço e sua respectiva energia de impacto com o objetivo de verificar se o material atendeu ou não aos requisitos impostos pela norma.

Tabela 8 – Verificação dos requisitos estabelecidos pela norma ABNT NBR 15575-5 – Anexo C para telhas cerâmicas romanas.

Altura (H) [m]	Energia de Impacto (E) [J]	Resultado NBR 15575- 5-Anexo C	Observações
0,5	0,32	APROVADO	Não houve ruptura/traspassamentos
1,0	0,64	APROVADO	Não houve ruptura/traspassamentos
1,5	0,96	APROVADO	Não houve ruptura/traspassamentos
2,0	1,29	APROVADO	Não houve ruptura/traspassamentos
2,5	1,61	APROVADO	Não houve ruptura/traspassamentos
3,0	1,93	APROVADO	Não houve ruptura/traspassamentos

5.1.2 Considerações em relação à norma NBR 15575-5 – Anexo C

A partir do ensaio realizado com base na norma NBR 15575 - Anexo C, as diferentes energias de impacto impostas no pano de telhas cerâmicas resultaram em diferentes ocorrências de dano, os quais podem ser comparáveis aos danos causados pelo impacto de pedras de granizo.

Primeiramente as considerações foram feitas analisando-se as amostras testadas a partir de apenas um impacto na região central da telha.

A Figura 14 apresenta os danos observados após impacto da esfera de aço lançada a 0,5 metros.

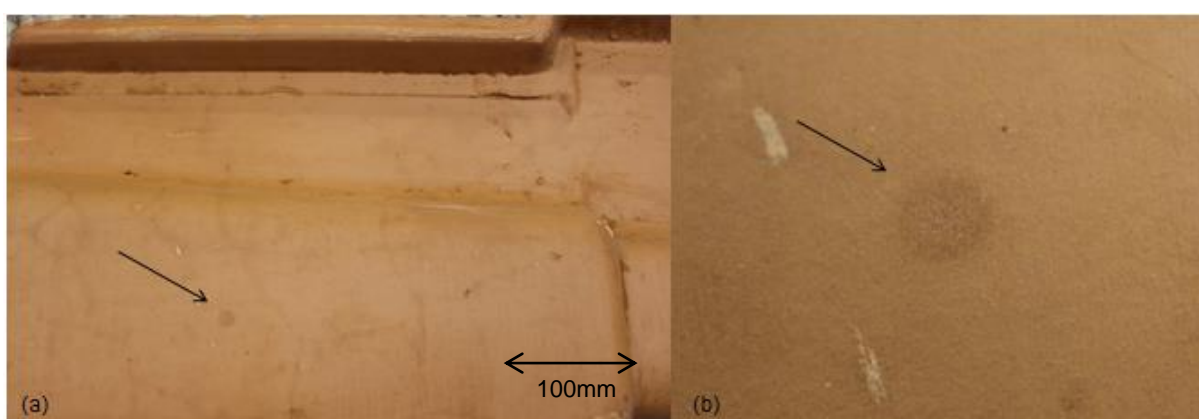


Figura 14 – (a) Marca superficial após impacto de esfera de aço em telha cerâmica a 0,5 metros; (b) Ampliação indeterminada com o zoom da máquina fotográfica da marca de impacto.

Para lançamentos de altura de queda de 0,5 metros, foi possível notar somente pequenas marcas causadas pelo impacto da esfera de aço no material, porém sem observações de ocorrência de entalhes, nucleação de trincas e/ou fissuras. Ou seja, notou-se apenas uma pequena marca superficial, sem aparente dano mais severo que sugerisse um comprometimento da resistência mecânica conforme Figura 14.

Na Figura 15 estão apresentados os danos registrados após impacto a partir de 1,0 metro.

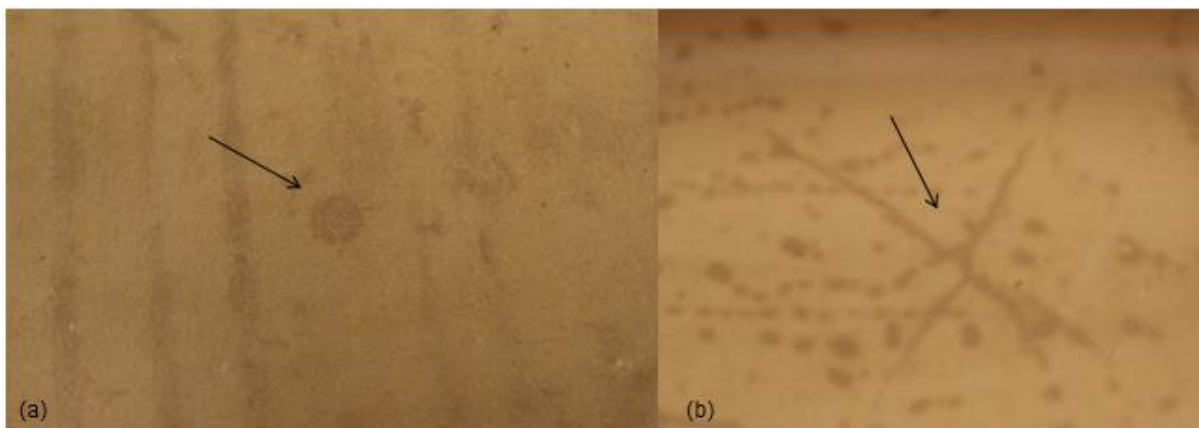


Figura 15 – (a) Marca superficial após impacto de esfera de aço em telha cerâmica a 1,0 metro com ampliação de aproximadamente 2x; (b) Marcas escuras na face posterior da telha ao ponto de impacto após imersão em água.

Na Figura 15(a) notou-se um pronunciamento da marca de impacto da esfera na parte superior da telha, semelhante ao observado na Figura 14(a). Examinando-se visualmente a face posterior da telha ao ponto de impacto, não se observou defeitos aparentes mais significativos. Entretanto, após imersão da telha em água e examinando a mesma região da superfície, observou-se a presença de marcas escuras, claramente provocadas pelo impacto da esfera, uma vez que não foram observadas nas telhas sem impacto. Visualmente, estes defeitos provocados pelo impacto parecem fissuras ou defeitos assemelhados, que podem evoluir para uma fratura verdadeira.

A forma e orientação desses defeitos sugerem que, em decorrência do impacto, surgiram novos defeitos assemelhados a fissuras, ou que podem ser precursores de fissuras verdadeiras e que, portanto, podem levar a fragilização do material.

As dimensões e orientações de cada um destes novos defeitos nucleados pelo impacto variam de marca para marca e de telha para telha, mas em termos gerais, os comprimentos dessas marcas são da ordem de dezenas de milímetros, eventualmente atingindo os contornos laterais da telha, dependendo da altura do lançamento.

Os danos obtidos após impacto da esfera de aço lançada a 1,5 metros estão apresentados na Figura 16.

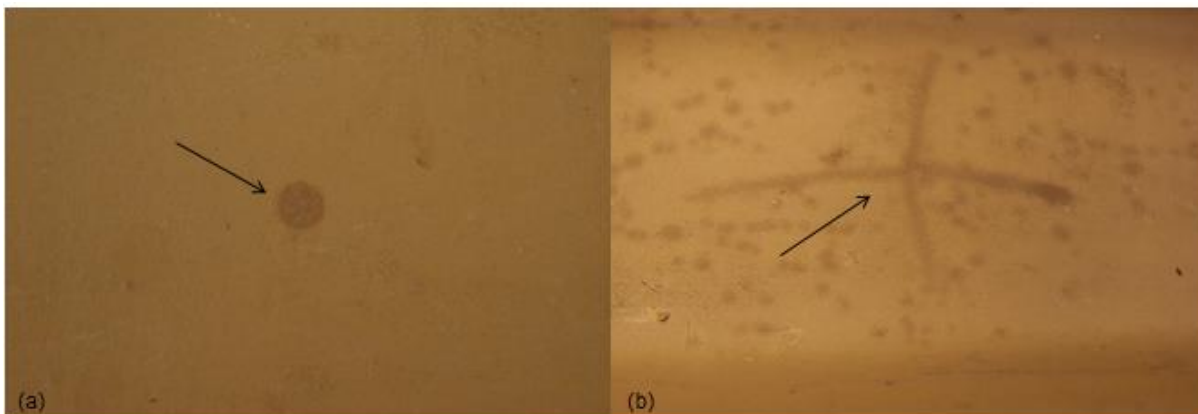


Figura 16 – (a) Marca superficial após impacto de esfera de aço em telha cerâmica a 1,5 metros com ampliação de aproximadamente 2x; (b) Nucleação de defeitos na face posterior da telha ao ponto de impacto após imersão em água.

Na parte superior da telha, a marca de impacto aparentemente foi um pouco mais pronunciada, desconsiderando diferenças de iluminação nos diferentes instantes em que as imagens foram tiradas (Figura 16(a)). No lado oposto da telha (Figura 16(b)), nota-se a nucleação de novos defeitos no local onde o impacto foi imposto.

Para alturas de lançamento de 2,0 metros, os danos estão registrados na Figura 17.

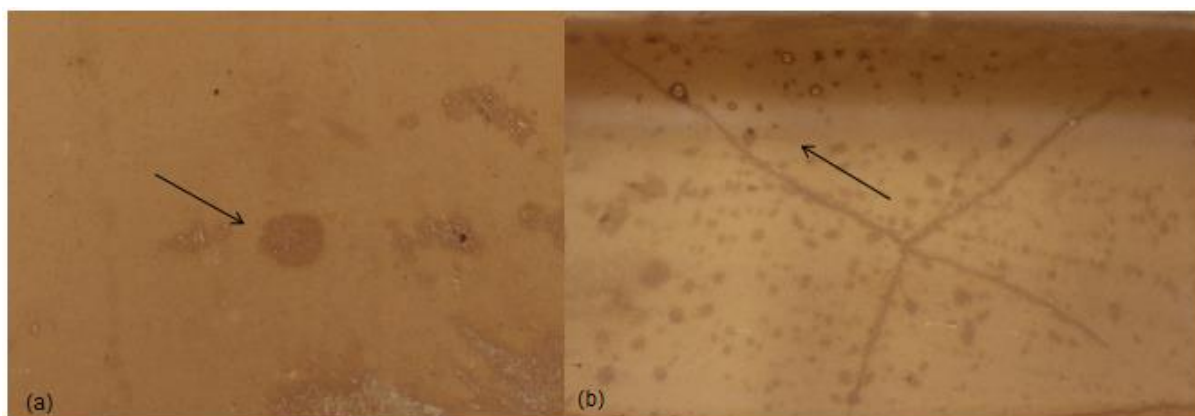


Figura 17 – (a) Marca superficial após impacto de esfera de aço em telha cerâmica a 2,0 metros com ampliação de aproximadamente 2x; (b) Nucleação de defeitos na face posterior da telha ao ponto de impacto após imersão em água propagando-se no sentido indicado pela seta.

A marca de impacto da esfera na Figura 17(a) se torna aparentemente mais evidente à medida que se aumenta a altura de lançamento e conseqüentemente, a energia de impacto na parte superior da telha e no local de impacto. Na parte posterior da telha, Figura 17(b), após imersão em água, nota-se um aumento da extensão dos defeitos e sua propagação no sentido indicado pela seta.

A Figura 18 ilustra os resultados observados após impacto da esfera de aço lançada a 2,5 metros.

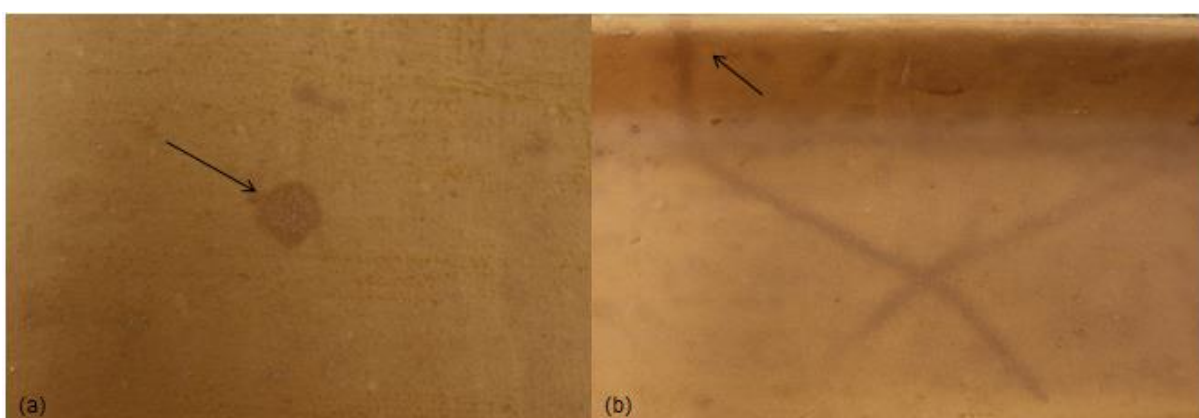


Figura 18 – (a) Marca superficial após impacto de esfera de aço em telha cerâmica a 2,5 metros com ampliação de aproximadamente 2x; (b) Nucleação de defeitos na face posterior da telha ao ponto de impacto após imersão em água propagando-se no sentido indicado pela seta.

As marcas de impacto da esfera na parte superior da telha permanecem em todas as amostras, como pode ser observado novamente na Figura 18(a). Um comportamento semelhante ao observado na Figura 15(b) é repetido para alturas de 2,5 metros, em que os defeitos se propagam em maior intensidade na direção indicada pela seta na Figura 18(b), quando se observa o lado posterior da telha após imersão em água.

A Figura 19 apresenta os danos observados após impacto de esfera de aço a partir de 3,0 metros.



Figura 19 – (a) Marca superficial após impacto de esfera de aço em telha cerâmica a 3,0 metros com ampliação de aproximadamente 2x; (b) Nucleação de defeitos na face posterior da telha ao ponto de impacto após imersão em água propagando-se no sentido indicado pela seta e surgimento de trinca aparente com ampliação de aproximadamente 2x; (c) Ampliação da trinca de aproximadamente 4x.

Para uma altura de queda de 3,0 metros, a Figura 19(a) ilustra a marca de impacto direto da esfera na parte superior da telha indicada pela seta. As Figuras 19(b) e 19(c) retratam a ocorrência de trincas visíveis a olho nu, quando as telhas foram impactadas a uma altura 3,0 metros, ou seja, com uma energia de impacto próxima a 2 J. Sendo assim, a telha começa a apresentar danos aparentes.

Apesar de a norma NBR 15575-5 prever uma condição a qual o material de cobertura deve atender, ela não estabelece uma graduação para o dano por impacto observado para diferentes alturas de queda de um corpo-rígido. Portanto, optou-se por graduar os efeitos observados nas amostras de telhas cerâmicas considerando uma sugestão da norma ASTM D3746-85, apresentada na tabela 7, onde as amostras são classificadas em 0 – não ocorrência de dano; 2 – somente endentações e/ou entalhes e; 4 – trincas, rachaduras e/ou divisões.

Além da consideração proposta pela a norma ASTM D3746-85, os conceitos de dano funcional e dano cosmético também foram aplicados.

A tabela 9 apresenta a classificação das amostras de telhas cerâmicas de acordo com os critérios abordados acima.

Tabela 9 – Classificação dos danos por impacto observados em telhas cerâmicas para diferentes energias de impacto.

Altura (H) [m]	Energia de Impacto (E) [J]	Observação Visual	Classificação ASTM D3746-85 (visíveis a olho nu)	Tipo de dano
0,5	0,32	Marcas de impacto da esfera de aço	0	COSMÉTICO
1,0	0,64	Marcas de impacto da esfera de aço e nucleação e propagação de trincas	0	COSMÉTICO
1,5	0,96	Marcas de impacto da esfera de aço e nucleação e propagação de trincas	0	COSMÉTICO
2,0	1,29	Marcas de impacto da esfera de aço e nucleação e propagação de trincas	0	COSMÉTICO
2,5	1,61	Marcas de impacto da esfera de aço e nucleação e propagação de trincas	0	COSMÉTICO
3,0	1,93	Marcas de impacto da esfera de aço, propagação de trincas, trinca aparente	4	COSMÉTICO ^(*)

(*) Apesar do aparecimento de trinca na telha, aparentemente não houve perda de estanqueidade do material.

Apesar da classificação apresentada na tabela 8 sugerir a observação de somente danos estéticos/cosméticos, os quais teoricamente não prejudicariam a funcionalidade do material de cobertura, por outro lado, as Figuras 14 a 19 sugerem uma evolução de um dano mecânico em que o impacto imposto pode ter nucleado danos estruturais internos que podem degradar a resistência mecânica da telha.

A segunda etapa deste ensaio consistiu em aumentar a severidade do impacto em uma mesma região das telhas, ou seja, aplicaram-se três impactos sucessivos na mesma região das telhas a partir de uma altura de lançamento da esfera de aço de 2,0 metros. Os aspectos superficiais da telha, após os impactos e subsequente imersão em água, estão apresentados na Figura 20, a qual corresponde à mesma amostra.

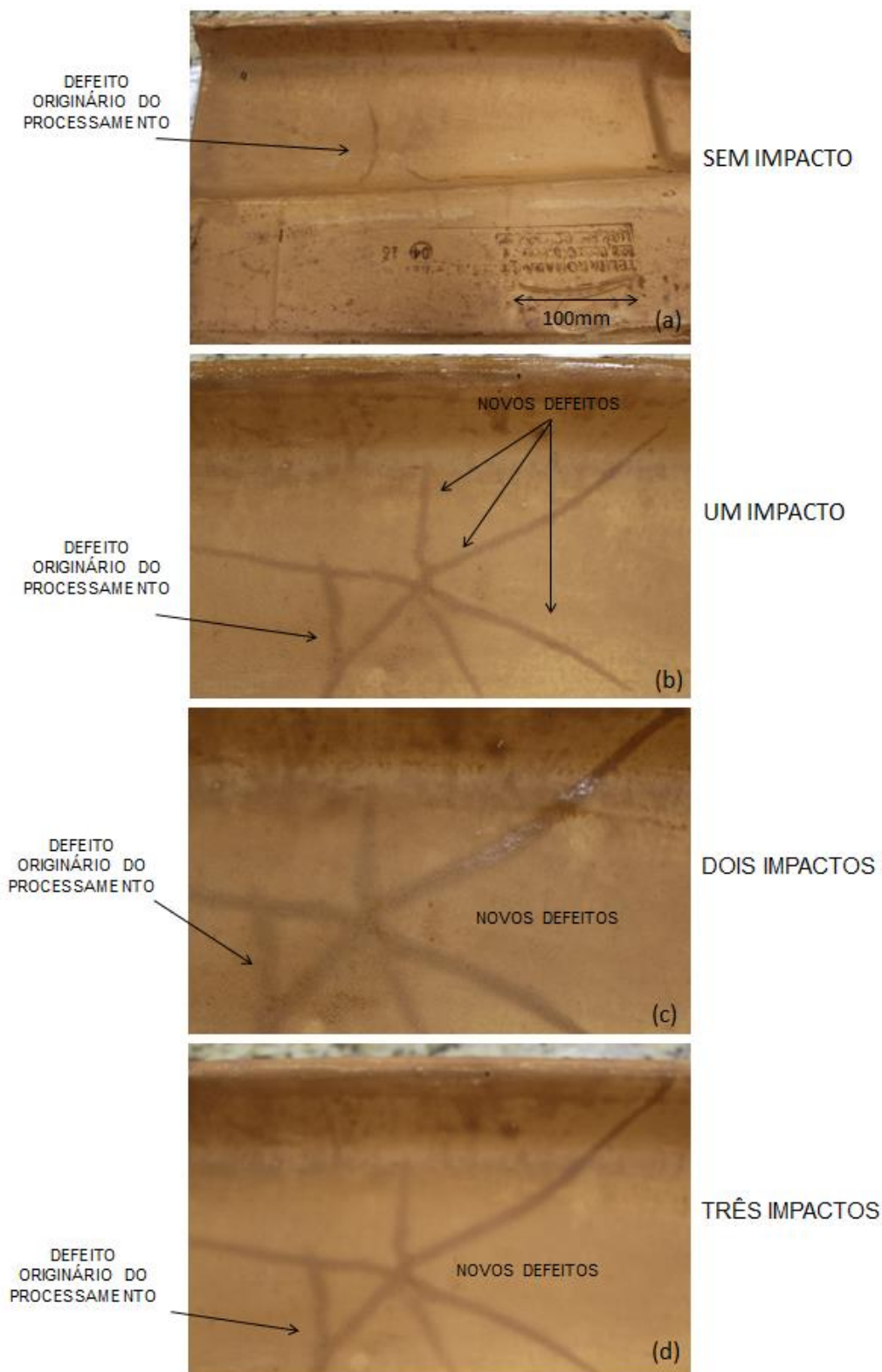


Figura 20 – Telha cerâmica impactada a partir de 2 metros; (a) Face posterior de telha sem nenhum impacto; (b) Nucleação de defeitos na face posterior da telha ao ponto de impacto após um impacto; (c) Nucleação de defeitos na face posterior da telha ao ponto de impacto após dois impactos sucessivos; (d) Nucleação de defeitos na face posterior da telha ao ponto de impacto após três impactos sucessivos.

Como se pode notar na Figura 20(a), mesmo sem qualquer impacto, a telha eventualmente apresenta defeitos próprios do processamento. Entretanto, observando-se as Figuras 20(b) e 20(d), torna-se evidente o surgimento de novos defeitos provocados pelo impacto cada vez mais severo da esfera.

Analisando outra amostra impactada três vezes consecutivas a partir de 2 metros de altura observou-se o surgimento de trincas verdadeiras e que evoluíram nitidamente a partir das fissuras causadas nos impactos anteriores, como está apresentado na Figura 21.

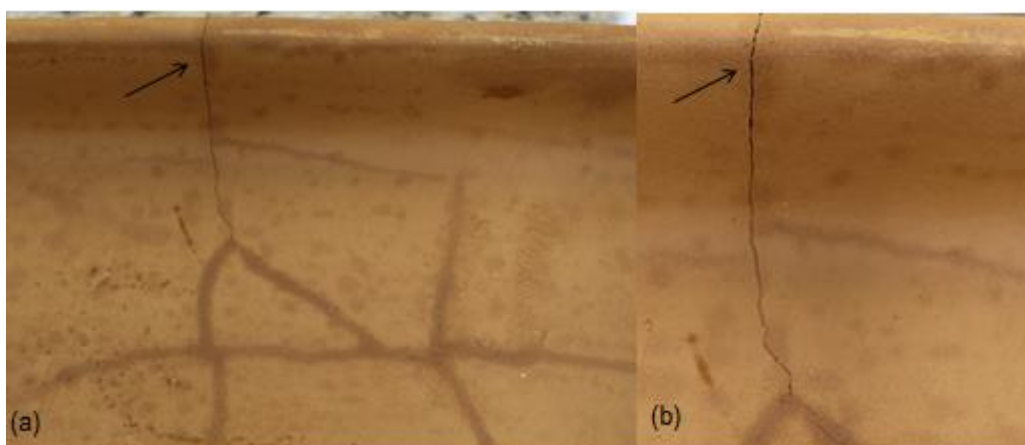


Figura 21 – (a) Face posterior de telha cerâmica após três impactos sucessivos de 2 metros e imersão em água; (b) Ampliação de aproximadamente 2x da trinca na face posterior da telha.

5.1.3 Coeficiente de Restituição

Como discutido anteriormente neste trabalho, o coeficiente de restituição pode ser considerado uma medida da habilidade do material que recebe o impacto de transferir uma quantidade de energia, sendo, portanto um importante parâmetro de impacto. Com base na norma ABNT NBR 13818 – Anexo C obtiveram-se resultados de coeficiente de restituição para telhas cerâmicas romanas impactadas de alturas de 1m, 1,5m, 2m e 3m, os quais estão apresentados na tabela 10. Os resultados individuais estão apresentados no Apêndice A.

Tabela 10 – Resultados de coeficiente de restituição médio para amostras de telhas cerâmicas romanas a partir de queda de uma esfera de aço a diferentes alturas.

Série	Energia de Impacto (J)	n	Coeficiente de Restituição (ϵ) Médio	Desvio padrão	Intervalo de confiança 95%
C-1	0,64	5	0,2754	0,05167	$0,2754 \pm 0,0641$
C-1,5	0,96	5	0,2484	0,10029	$0,2484 \pm 0,1245$
C-2	1,29	5	0,2372	0,06886	$0,2372 \pm 0,0855$
C-3	1,93	5	0,0888	0,00993	$0,0888 \pm 0,0123$

A Figura 22 representa graficamente a curva altura de lançamento versus coeficiente de restituição para amostras de telhas cerâmicas romanas cortadas em forma de placas planas de 75mm X 75mm.

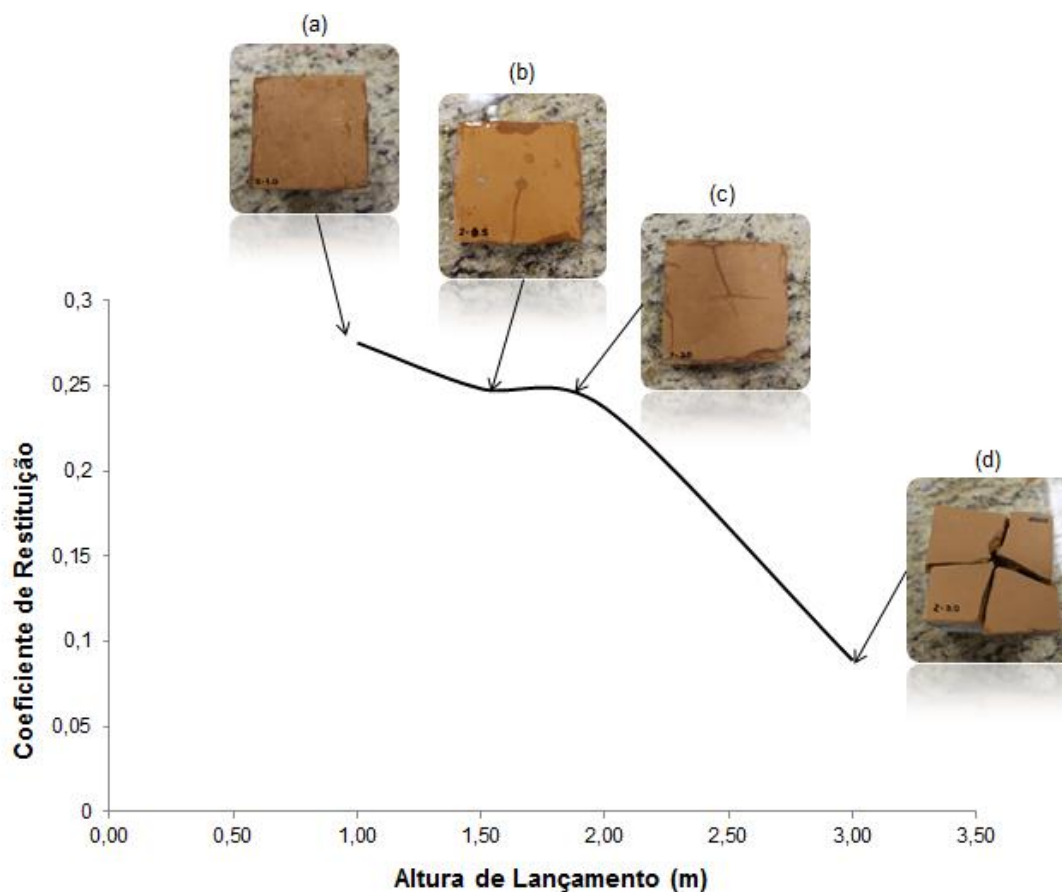


Figura 22 - Curva altura de lançamento versus coeficiente de restituição para amostras de telhas cerâmicas romanas.

Como se pode observar na Figura 22, a amostra (a) sofreu um impacto da esfera de aço partindo de uma altura de lançamento de 1 metro, notando-se somente uma pequena marca superficial, sem ocorrência de lascamentos ou trincamento da superfície. Nesta situação o material devolveu uma maior quantidade de energia, resultando em maiores alturas de restituição da esfera e por consequência, maiores valores de coeficiente de restituição. Impacto mais elástico.

Na Figura 22(b) a amostra foi impactada a partir de uma altura de lançamento de 1,5 metros, observando-se uma pequena queda aparente nos valores médios de coeficiente de restituição. É razoável supor que a marca superficial que se estende a partir do ponto de impacto e que se tornou evidente após a penetração da água, trata-se de uma fissura (ou de defeito precursor de fissura), evidentemente causada pelo impacto da esfera. Sendo este o caso, o processo implica naturalmente em um dispêndio energético para a formação das novas superfícies livres (de fratura) (MEYERS&CHAWLA, 1999), com redução esperada no coeficiente de restituição.

Na amostra da Figura 22(c), em função do aumento da severidade do impacto (2 metros), observou-se uma tendência à multiplicação das fissuras, sem reflexo aparente, entretanto, sobre o valor médio do coeficiente de restituição.

Já para o caso da amostra da Figura 22(d) houve uma queda acentuada nos valores de coeficiente de restituição. A amostra foi impactada a uma altura de 3 metros, com alta energia de impacto. Como o material cerâmico é caracterizado por suas propriedades altamente elásticas, quando a este é imposto condições de impacto muito severas, sofre trincas pronunciadas levando à ruptura catastrófica do material e fragmentação da peça. Nesse caso, o coeficiente de restituição tende a valores próximos de zero, em função do alto dispêndio energético para alimentar as superfícies de fratura.

Com vistas a uma comparação estatística das médias, os dados apresentados na tabela 10 foram primeiramente submetidos ao Teste de Bartlett, para comparação das variâncias. Os resultados estão apresentados na tabela 11:

Tabela 11 – Resultados dos testes estatísticos de comparação de variância dos valores de coeficiente de restituição de telhas cerâmicas.

Séries Comparadas	Significância do teste	Estatística teste χ^2	Estatística crítica χ^2 (crítico-5%)	Resultado
C-1;C-1,5;C-2;C-3	5%	12,3	7,82	Rejeitar H0
C-1;C-1,5;C-2	5%	1,58	5,99	Não rejeitar H0

Considerando-se os resultados da comparação das variâncias das quatro séries estudadas (tabela 11), conclui-se que, ao nível de significância de 5%, há evidências experimentais suficientes para rejeitar a hipótese de igualdade das variâncias, ou seja, pelo menos uma das variâncias das séries comparadas é diferente das demais.

Em análise de variância (ANOVA) estão implícitas as hipóteses de homocedasticidade e de que a variável de interesse seja normalmente distribuída. Entretanto, segundo Costa Neto (1977), a técnica é robusta, de forma que ainda que haja algum afastamento das hipóteses básicas, os resultados ainda são válidos com razoável aproximação. Assim sendo, mesmo considerando-se os resultados da comparação de variâncias apresentados na tabela 11, as médias foram comparadas por meio de ANOVA, cujos resultados estão apresentados na tabela 12.

Tabela 12 – Resultados de ANOVA das médias de coeficiente de restituição de telhas cerâmicas.

Séries Comparadas	Significância do teste	Estatística teste F_{calc}	Estatística crítica $F_{\text{Crítico}} (3;16)$	Resultado
C-1;C-1,5;C-2;C-3	5%	8,03	3,24	Rejeitar H0
C-1;C-1,5;C-2	5%	0,33	3,89	Não rejeitar H0

Considerando-se os resultados da análise de variância apresentados na tabela 12, pode-se considerar que há uma variação no coeficiente de restituição médio, quando a altura do impacto da esfera aumenta de 1m a 3m. Esse resultado,

certamente foi influenciado pela marcante redução do coeficiente de restituição na altura de 3 metros, em decorrência da fragmentação do material.

Entretanto, comparando-se as três primeiras séries, com impactos a 1m, 1,5m e 2m, não se pode afirmar, com base nas evidências experimentais, que há diferença entre as médias, ao nível de significância de 5%. Apesar da evidência de ocorrência de danos ao material apresentada entre os pontos (a) e (c) da Figura 21 e pela aparente sensibilidade do coeficiente de restituição para acompanhar esta evolução, estatisticamente as diferenças não são significativas (ao nível de 5% de significância), em função da alta dispersão dos resultados, típica do comportamento mecânico dos materiais cerâmicos. O número de amostras recomendados pela norma (5) é muito reduzido, considerando-se a natureza frágil do material cerâmico.

Os materiais cerâmicos são materiais normalmente frágeis, com reduzida ductilidade, o que os torna muito sensíveis à presença de falhas naturalmente presentes no material (ZANOTO & MIGLIORI, 1991), em decorrência do próprio processamento. Em geral, as falhas variam de tamanho, forma e orientação; conseqüentemente, a resistência do material varia de amostra para amostra, uma vez que quando se testa um material frágil, a ruptura irá ocorrer quando uma ou várias das falhas de maior tamanho e de orientação mais crítica se propagar. Como conseqüência, a dispersão dos resultados representada pelo desvio padrão amostral é elevada. Assim sendo, uma forma de aumentar a precisão, reduzindo o erro padrão da média e conseqüentemente a amplitude do intervalo de confiança de 95%, é aumentar o tamanho da amostra. Por exemplo, considerando-se os valores de desvio padrão da tabela 9, estima-se que se o número de amostras for aumentado para 25, o erro padrão da média, em relação à média deve ser de aproximadamente 10%, o que poderia tornar o coeficiente de restituição mais eficiente como medida da evolução do dano com a energia do impacto.

5.1.4 Ensaio de Flexão Simples (FR)

As telhas impactadas conforme o ensaio descrito na seção 4.1.3, foram posteriormente ensaiadas em flexão simples de três apoios. Os resultados do ensaio de flexão simples em telhas cerâmicas após um único impacto da esfera de aço em cada amostra, a diferentes alturas, estão demonstrados na tabela 13. Os resultados individuais estão apresentados no Apêndice B.

Tabela 13 – Resultados do ensaio de flexão simples com telhas cerâmicas impactadas uma única vez a partir de diferentes alturas.

Ensaio de Flexão Simples - 1 impacto				
Série	n	Carga de Ruptura média (Kgf)	Desvio padrão	Intervalo de confiança 95%
S-0,5	6	233,0	64,9	233,0 ± 68,1
S-1	6	164,0	32,4	164,0 ± 34,0
S-1,5	6	235,9	28,9	235,9 ± 30,3
S-2	6	187,2	71,8	187,2 ± 75,4
S-2,5	6	232,4	49,6	232,4 ± 52,1
S-3	6	216,1	50,6	216,1 ± 53,1

É razoável supor que durante uma chuva de granizo ocorram impactos sucessivos de gelo em uma mesma região da telha. Assim, para fins comparativos, optou-se estrategicamente por aumentar a severidade do impacto da esfera de aço, ou seja, de um único impacto para três impactos sucessivos nas regiões centrais das telhas a partir de alturas de 2,0 metros. A altura de 2,0 metros foi arbitrariamente escolhida, antes da realização dos testes. Os efeitos visíveis decorrentes de três impactos sucessivos na mesma região da telha foram apresentados nas Figuras 19 e 20.

Na tabela 14 encontram-se os resultados do ensaio de flexão simples com as amostras de telhas cerâmicas que não sofreram nenhum impacto, as que sofreram um único impacto e as que sofreram três impactos na mesma região.

Tabela 14 – Resultados do ensaio de flexão simples em telhas cerâmicas não impactadas, impactadas uma única vez e impactadas três vezes a partir de 2 metros.

Ensaio de Flexão Simples - Sem/Um/Três impactos				
Série	n	Carga de Ruptura Média (Kgf)	Desvio padrão	Intervalo de confiança 95%
S-0	6	186,6	84,2	186,6 ± 88,4
S-2	6	187,2	71,8	187,2 ± 75,4
S-2-3	6	139,6	39,8	139,6 ± 41,8

Objetivando uma comparação estatística das médias dos resultados de flexão de três pontos, os dados apresentados nas tabelas 13 e 14 foram primeiramente submetidos ao teste de Bartlett, para comparação das variâncias. Os resultados estão apresentados na tabela 15:

Tabela 15 - Resultados dos testes estatísticos de comparação de variância dos valores de resistência à flexão de telhas cerâmicas.

Séries Comparadas	Significância do teste	Estatística teste χ^2	Estatística crítica χ^2 (crítico-5%)	Resultado
S-0,5; S-1; S-1,5; S-2; S-2,5; S-3	5%	5,60	11,07	Não rejeitar H0
S-0; S-2; S-2-3	5%	2,42	5,99	Não rejeitar H0

Considerando-se os resultados apresentados na tabela 15, pode-se concluir que, ao nível de significância de 5%, não há evidências experimentais de que as variâncias das séries comparadas sejam diferentes.

Os resultados das tabelas 13 e 14 foram então submetidos à análise de variâncias para comparação das médias das diferentes séries estudadas. Os resultados de ANOVA estão apresentados na tabela 16:

Tabela 16 – Resultados de ANOVA das médias de resistência à flexão das telhas cerâmicas.

Séries Comparadas	Significância do teste	Estatística teste F_{calc}	Estatística crítica $F_{Crítico (3;16)}$	Resultado
S-0,5; S-1; S-1,5; S-2; S-2,5; S-3	5%	1,93	2,53	Não rejeitar H_0
S-0; S-2; S-2-3	5%	0,97	3,63	Não rejeitar H_0

Considerando-se os resultados dos testes de ANOVA, conclui-se que não há evidências experimentais, ao nível de significância de 5%, que as médias sejam diferentes, apesar de, particularmente, notar-se sensível diferença na carga de ruptura média após três impactos sucessivos e dos efeitos visíveis da ocorrência de fissuras ou defeitos assemelhados após os impactos. Novamente, considera-se discussão desenvolvida no item 5.1.3, ou seja, em função da alta dispersão que caracteriza tipicamente os resultados de ensaios de resistência de materiais cerâmicos, a sensibilidade da comparação das médias é provavelmente prejudicada pelo reduzido número de corpos-de-prova (6) definidos pela norma.

Outra questão importante pode ser discutida, a qual relaciona algumas limitações do ensaio de flexão de três pontos (CARVALHO & DUARTE, 2000). Mesmo em corpos-de-prova de seções regulares e de faces paralelas, a distribuição de tensões de flexão não é uniforme ao longo do comprimento da amostra. A Figura 23 foi obtida por fotoelasticidade e mostra claramente como são complexos os campos de tensão entre os pontos de contato dos cutelos/apoios. Nesta configuração de ensaio, a probabilidade de se encontrar um defeito crítico justamente na zona de pico de tensão do corpo de prova (região do contato do cutelo superior) é menor. Por outro lado, na configuração de ensaio de quatro pontos, a região de máxima tensão de flexão se estende por uma região maior, o que se reflete em carga de ruptura mais sensível à distribuição interna de defeitos (PERES, 2016).

A Figura 24, também obtida em ensaio de fotoelasticidade apresenta os campos de tensão em uma viga prismática em carregamento de flexão de quatro pontos, sendo nítida a diferença de uniformidade dos campos de tensão, quando comparada com a Figura 23. Assim, é razoável supor que mesmo que a telha tenha

sido eventualmente fragilizada pelo surgimento de fissuras decorrentes dos impactos, talvez o posicionamento delas em relação à posição do cutelo durante o ensaio não tenha sido mais desfavorável que a de defeitos originalmente presentes no material.

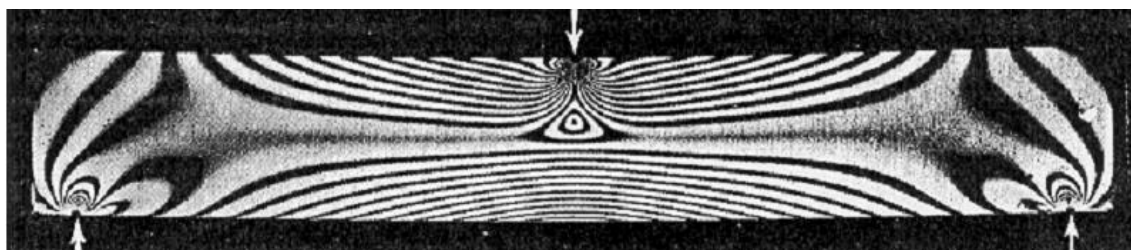


Figura 23 – Imagem obtida em ensaio de fotoelasticidade de corpo-de-prova de seção retangular submetido à flexão de três pontos.
Fonte: Carvalho & Duarte (2000).

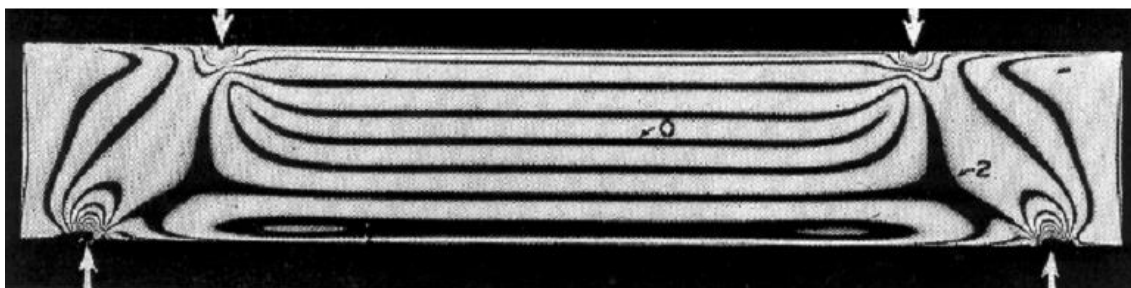


Figura 24– Imagem obtida em ensaio de fotoelasticidade de corpo-de-prova de seção retangular submetido à flexão de quatro pontos.
Fonte: Carvalho & Duarte (2000).

Certamente, além das tensões originadas da flexão, outras componentes de tensão originárias das imperfeições geométricas das próprias telhas intervêm na determinação do resultado de cada ensaio. Por exemplo, embora o cutelo de aplicação da força tenha sido cuidadosamente confeccionado a partir do formato geométrico “médio” da telha cerâmica romana, incluindo uma lâmina de borracha para acomodar as diferenças mais grosseiras, mesmo pequenas diferenças de peça para peça podem provocar diferentes tensões de contato, relevantes se considerar que o material estudado é muito sensível à concentração de tensão.

A geometria da telha aliado a diferenças de contato entre os cutelos e a amostra também favorece o surgimento de tensões de torção.

Todos estes fatores concorrem, juntamente com a natureza do material cerâmico, para a alta dispersão dos resultados. Assim, com um número reduzido de corpos-de-prova, pode ser difícil notar eventual prejuízo da resistência mecânica com os impactos no ensaio de flexão de três pontos, com nível de significância aceitável. Curiosamente, a norma não faz referência à dispersão dos resultados. Novamente, com vista à obtenção de resultados mais sensíveis e precisos, recomenda-se o aumento do número de corpos de prova no estudo para 25, por exemplo, e a realização do teste de flexão na configuração de quatro pontos.

Considerando-se a grande sensibilidade da resistência mecânica dos componentes cerâmicos à presença de falhas, é comum a realização de estudos do comportamento mecânico destes materiais com auxílio da distribuição Weibull (ZANOTTO & MIGLIORE JR, 1991; SCHÖN, 2013). Apesar do número de corpos de prova ser muito pequeno para uma análise de Weibull, até mesmo para se fazer um teste de aderência dos resultados a esta distribuição teórica de probabilidades (COSTA NETO, 1977), a Figura 25 apresenta o resultado da aplicação do método aos resultados das séries S-0 e S-2-3 apresentados na tabela 14, sendo os dados de carga de ruptura e probabilidade de falha lançados em escala bi-logarítmica. Nas respectivas equações das retas indicadas na Figura 25, a inclinação é o parâmetro de Weibull (m), enquanto que o intercepto está relacionado com a carga característica P_0 do modelo¹⁰ (ZANOTTO & MIGLIORE JR, 1991; SCHÖN, 2013).

¹⁰ Na verdade, no modelo de Weibull, o parâmetro característico da resistência é a tensão σ_0 , e não a carga. Neste caso, trata-se de uma adaptação do modelo, apenas para fins de argumentação, uma vez que não é viável o cálculo das tensões de ruptura em cada caso.

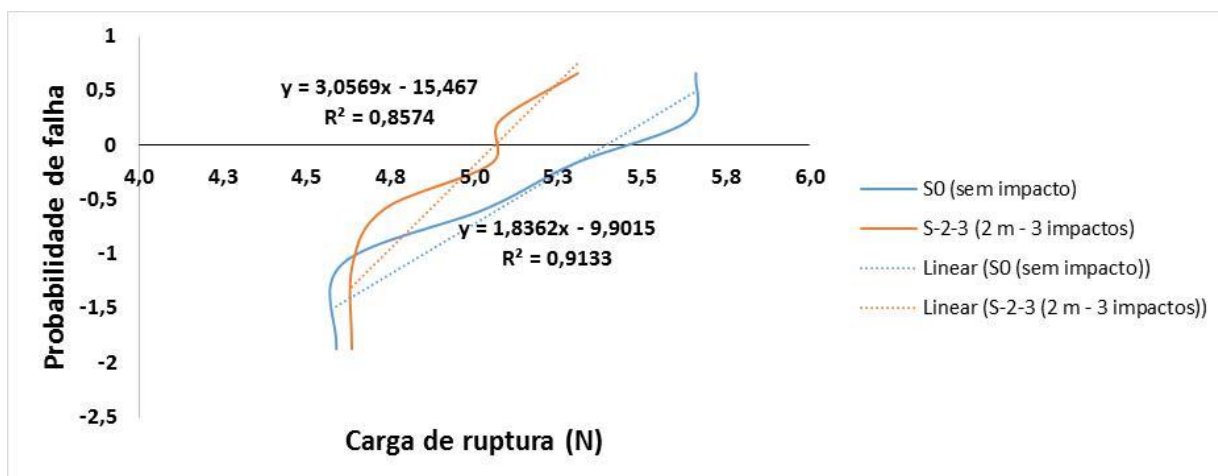


Figura 25 – Gráfico de Weibull correspondente aos resultados dos ensaios de flexão de três pontos apresentados na tabela 13.

Ainda que muito imprecisos, considerando-se o reduzido número de amostras para uma análise de Weibull e as limitações da configuração do ensaio de flexão de três pontos, os resultados apresentados na Figura 25 sugerem que com o aumento da severidade dos impactos, há uma redução da resistência média da amostra (a carga característica diminuiu aproximadamente 30%), enquanto que a variação do parâmetro m , de 1,84 para 3,06 sugere uma redução na dispersão dos resultados, provavelmente decorrente dos efeitos dos impactos sobre a amostra. Entretanto, estas impressões devem ser consideradas com cautela, recomendando-se a realização de um estudo mais amplo, com a realização de um número maior (idealmente maior que 30) de testes.

5.2 TELHA DE FIBROCIMENTO

5.2.1 Resultados de Acordo com a Norma NBR 15575 – Anexo C

As telhas de fibrocimento foram analisadas em relação à norma NBR 15575-Anexo C para verificação da resistência ao impacto de um corpo-rígido com diferentes energias de impacto. Os mesmos níveis de energia de impacto aplicados no pano de telhas cerâmicas foram aplicados na telha de fibrocimento, com lançamento de esfera de aço a 0,5 m, 1 m, 1,5 m, 2 m, 2,5 m e 3 m.

Na Figura 26 estão apresentados os efeitos observados na superfície da telha de fibrocimento após impacto da esfera de aço.

A partir da Figura 26(a) e 26(b) foi possível observar o surgimento de pequenas marcas de endentação causadas pelo impacto da esfera de aço no material (marcas do tipo I), e à medida que a altura de impacto aumentou, notou-se um pronunciamento no diâmetro desta marca nas Figuras 26(c) até 26(f). Além disso, observou-se que a partir do impacto da esfera de aço ocorreu o surgimento de pequenas fissuras ou defeitos assemelhados acima e abaixo das marcas de impacto (marcas do tipo II).

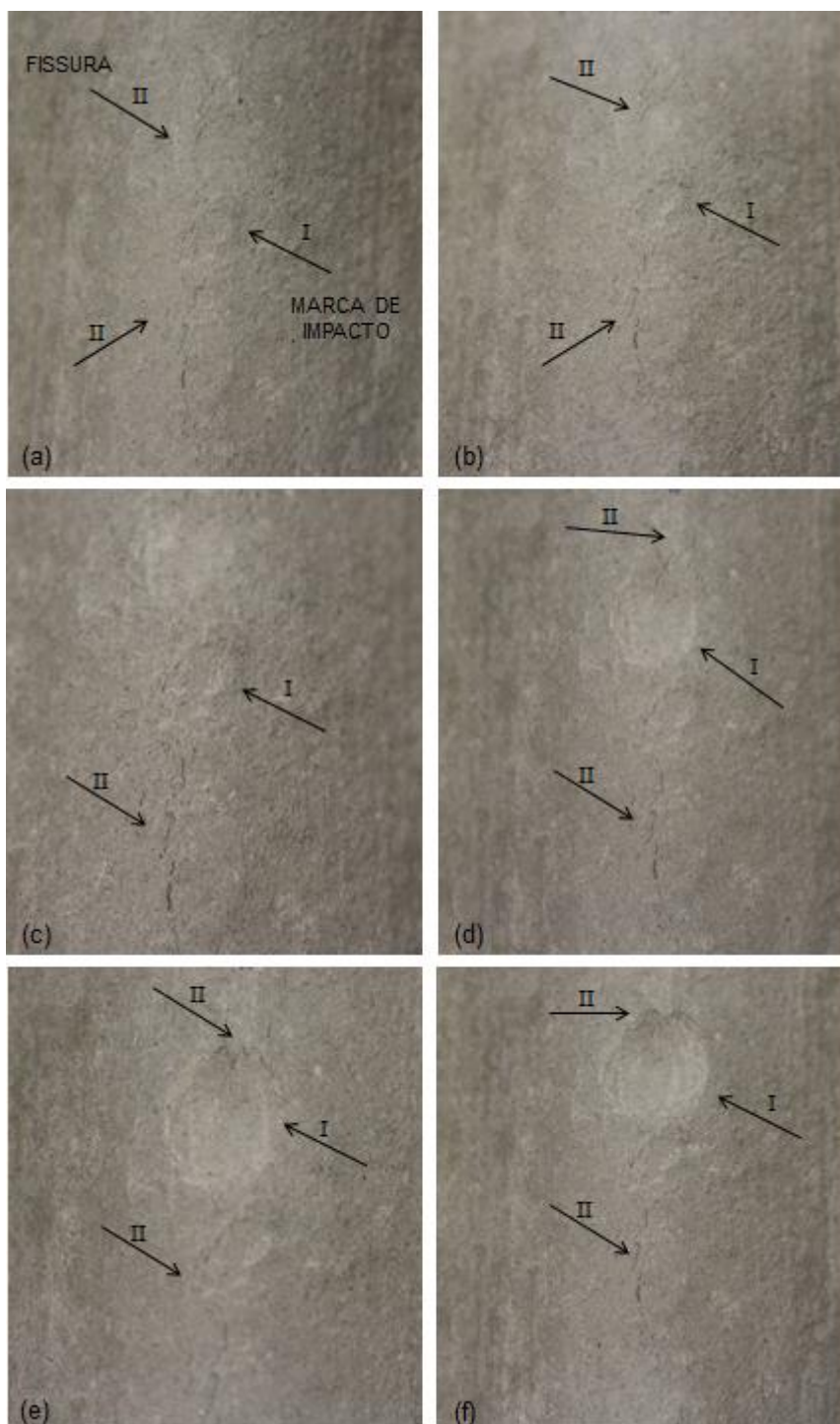


Figura 26 – Parte superior de telha de fibrocimento após impactos de uma esfera de aço a partir de alturas de (a) 0,5 m; (b) 1,0 m; (c) 1,5 m; (d) 2,0 m; (e) 2,5 m; (f) 3,0 m. As marcas I indicam as marcas de impacto causadas pela esfera de aço de 1 polegada; as marcas II indicam a ocorrência de fissuras acima e abaixo da marca de impacto.

Materiais compósitos costumam ser materiais relativamente frágeis quando comparados com os materiais metálicos, refletindo em sua baixa tolerância a concentração de tensão (CAMPBELL, 2010), o que, por sua vez, se traduz em uma menor habilidade para resistir a impactos sem a ocorrência de extensiva fratura da matriz. O dano decorrente do impacto pode restringir-se a uma pequena endentação na superfície, mas pode propagar-se através do compósito, dependendo da energia de impacto, formando uma rede complexa de delaminação e fratura da matriz (CAMPBELL, 2010), podendo reduzir a resistência estática do componente.

A avaliação da eventual redução na resistência mecânica da telha de fibrocimento após impactos, considerando-se particularmente as fissuras observadas (Figura 26), não pôde ser realizada neste projeto, em virtude da indisponibilidade da base de ensaios necessária para a realização dos testes conforme a norma NBR 6468:1993 – Telha de fibrocimento – Determinação da resistência à flexão.

Considerando-se apenas o aspecto visual da superfície das telhas, os danos imediatos decorrentes dos impactos observados aparentam ser somente de natureza cosmética. A tabela 17 apresenta a classificação da telha de fibrocimento de acordo com os critérios das normas para materiais de cobertura. Os efeitos observados aparentemente não comprometeram a estanqueidade do material, portanto a telha estaria aprovada segundo a norma NBR 15575-5 e a classificação de todos os efeitos pode ser considerada como tipo 2 (somente endentações) segundo a norma ASTM D3746-85.

Tabela 17 – Classificação dos danos por impacto observados em telha de fibrocimento para diferentes energias de impacto.

Altura (H) [m]	Energia de Impacto (E) [J]	Observação Visual	Resultado NBR 15575-5-Anexo C	Classificação ASTM D3746-85 (visíveis a olho nu)	Tipo de dano
0,5	0,32	Marca de impacto da esfera de aço e fissuras	APROVADO	2	COSMÉTICO
1	0,64	Marca de impacto da esfera de aço e fissuras	APROVADO	2	COSMÉTICO
1,5	0,96	Pronunciamento da marca de impacto e fissuras	APROVADO	2	COSMÉTICO
2	1,29	Pronunciamento da marca de impacto e fissuras	APROVADO	2	COSMÉTICO
2,5	1,61	Pronunciamento da marca de impacto e fissuras	APROVADO	2	COSMÉTICO
3	1,93	Pronunciamento da marca de impacto e fissuras	APROVADO	2	COSMÉTICO

(*) Apesar do aparecimento de trinca na telha, aparentemente não houve perda de estanqueidade do material.

Segundo Werland (2015), as telhas de fibrocimento de espessuras pequenas (4 mm) não possuem propriedades mecânicas adequadas para resistirem a impactos de granizo com diâmetros superiores a 45 mm, considerando a exigência da norma NBR 15575-5 em que as coberturas devem suportar uma energia de impacto de 1,0 J, sem ocorrer ruptura ou transpassamento. Além disso, ao se considerar efeitos de envelhecimento através da exposição solar, chuva ácida e maresia, os efeitos podem ser ainda mais negativos quanto à resistência mecânica das telhas de fibrocimento.

5.2.2 Coeficiente de Restituição

Com base na norma ABNT NBR 13818 – Anexo C obteve-se resultados de coeficiente de restituição para duas amostras de telhas de fibrocimento com espessura de 6mm, impactadas de alturas de 2 metros, os quais estão apresentados na tabela 18.

Tabela 18 – Resultados de coeficiente de restituição médio para amostras de telhas de fibrocimento a partir da queda de uma esfera de aço a partir de 2 metros.

Série	Energia de Impacto (J)	n	Coeficiente de Restituição (ϵ) Médio	Desvio padrão	Intervalo de confiança 95%
F-2	1,29	2	0,269	0,049	0,269 \pm 0,0608

Apesar do reduzido número de amostras, e apenas para fins de complementação do trabalho, os resultados de coeficiente de restituição obtidos em lançamentos de 2 metros para o material cerâmico (tabela 10 – série C-2) foram comparados com os resultados da tabela 18 (fibrocimento).

Primeiramente, as variâncias das duas séries foram comparadas segundo o método convencional, com auxílio da distribuição F de Snedecor (COSTA NETO, 1977). O resultado foi que as variâncias das duas séries podem ser tomadas como pertencentes à mesma população. Partindo-se da hipótese de igualdade de variâncias, a comparação das médias do coeficiente de restituição foi baseada na distribuição *t* de Student, com 5 graus de liberdade, adotando-se como hipótese nula a igualdade das médias, sendo os dados tomados como não emparelhados (não correlacionados). O resultado do teste foi que, ao nível de significância de 5%, não há evidências experimentais de diferença entre as médias do coeficiente de restituição para o material cerâmico e o material compósito, quando submetidos ao impacto da esfera de aço lançada de uma altura de 2 metros, conforme a norma ABNT NBR 13818 – Anexo C.

5.3 TELHA METÁLICA

Os metais possuem razoável ductilidade, o que favorece o relaxamento local da tensão e a distribuição da deformação para o material adjacente. Este processo promove a habilidade do material para absorver grande quantidade de energia até a ruptura (PERES, 2016). Como resultado, uma superfície metálica, quando impactada, tipicamente se deforma (permanentemente) sob o efeito da queda de granizo, mas dificilmente sofreria fratura.

Assim, neste caso, considerando-se a diferença muito significativa de comportamento mecânico em relação aos outros materiais estudados e a expectativa de resultados pouco relevantes, não foram realizados ensaios específicos para esta classe de materiais. Os efeitos mais severos, eventualmente observados em materiais metálicos frente a impactos causados por granizo estão demonstrados na Figura 27.

Portanto, de acordo com as exigências da norma NBR 15575-5, os impactos da esfera de aço dificilmente comprometeriam a estanqueidade da telha metálica em face da aplicação de impactos com energias iguais a 1,0 J. Na classificação da norma ASTM D3746-85 o dano em materiais metálicos pode ser identificado como tipo 2, em que observa-se somente endentações e/ou entalhes. No caso deste material, a medição do coeficiente de restituição seria pouco útil por não envolver um processo de fratura.

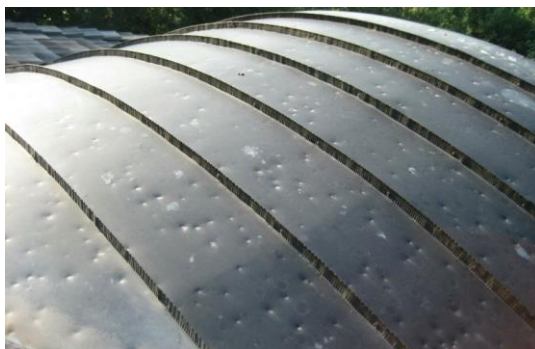


Figura 27 – Representação dos efeitos ocorridos em telhas metálicas após impactos de granizo.

Fonte: Kulh's Contracting (2012).

6 CONCLUSÕES

O impacto estimado à partir de esfera de aço pode ocasionar danos, tanto cosméticos quanto funcionais, aos materiais de cobertura, dependendo do diâmetro do granizo, natureza do material de cobertura, substrato da cobertura, entre outros fatores.

Neste trabalho, observou-se que ao simular o impacto causado por granizo através de impactos com uma esfera de aço de uma polegada, as alturas de lançamentos da esfera e conseqüentemente a energia de impacto influenciaram nos efeitos causados nos materiais de cobertura. Considerando as exigências da norma brasileira (NBR 15575-5/2013), conclui-se que os impactos da esfera de aço não afetaram a estanqueidade das telhas cerâmicas. Entretanto, quando as superfícies das telhas cerâmicas foram imersas em água, revelou-se a nucleação de defeitos semelhantes a fissuras à medida que se aumentou a severidade do impacto. Considerando-se a natureza frágil do material cerâmico, tais defeitos potencialmente podem reduzir a resistência mecânica da telha. Portanto, é razoável concluir que a norma não oferece parâmetros que graduem os diferentes efeitos e a extensão dos danos causados pelo impacto do granizo.

Não há evidência experimental suficiente neste trabalho, ao nível de significância de 5%, para afirmar que há alteração (redução) da resistência mecânica das telhas cerâmicas com o impacto do granizo. Entretanto, as observações na superfície atingida e os resultados médios sugerem uma redução na resistência mecânica com o aumento da severidade do impacto. Recomenda-se que, para melhor verificação dos efeitos do impacto do granizo sob a resistência das telhas, o ensaio de flexão seja realizado na configuração de quatro pontos, e com número maior de corpos-de-prova.

Os resultados do coeficiente de restituição sugerem que este parâmetro obtido conforme a norma NBR 13818 é sensível aos danos causados pelo impacto de partículas sólidas contra os materiais de cobertura. Entretanto, não há evidência experimental suficiente neste trabalho, ao nível de significância de 5%, para confirmar esta hipótese, em função da dispersão dos resultados, própria dos materiais frágeis.

A quantidade de corpos de prova determinada tanto para a norma de ensaio de flexão como para coeficiente de restituição é muito reduzida para se obter uma comparação de resultados de resistência mecânica de diferentes series de materiais cerâmicos. Recomenda-se utilizar aproximadamente 25 corpos-de-prova em cada ensaio para uma avaliação mais significativa dos danos causados pelo impacto de partículas sólidas.

As telhas de fibrocimento são sensíveis ao impacto de partículas sólidas. Marcas de endentação tornam-se cada vez mais significativas com o aumento da severidade (energia) do impacto. Mesmo impactos de baixa energia podem provocar a ocorrência de fissuras próximas ao ponto de impacto nas telhas de 4mm de espessura.

As telhas metálicas são sensíveis ao impacto de partículas sólidas, normalmente resultando em deformação plástica localizada na região do impacto, mais ou menos pronunciada, conforme a energia do impacto. Entretanto, é pouco provável que ocorra um dano mais severo que o dano cosmético, como por exemplo, a ruptura do metal e o conseqüente comprometimento da estanqueidade da telha, pelo menos nas faixas de energia normalmente associadas às partículas de gelo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão**. NBR 7215. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Componentes Cerâmicos – Telhas – Terminologia, requisitos e métodos de ensaio**. Anexo C – Carga de ruptura à flexão simples (FR) – Flexão a três pontos. NBR 15310. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT . **Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 5: Requisitos para o sistema de coberturas**. Anexo C – Verificação da resistência ao impacto em telhados – Método de ensaio. NBR 15575-5. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT . **Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaio**. Anexo Q – Determinação da resistência ao impacto. NBR 13818. Rio de Janeiro, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM D3746-85 **Standard Test Method for Impact Resistance of Bituminous Roofing Systems**. 2015.

BALDINI, F. P.; OLIVEIRA, A. M. De; SANTOS, J. L. A. dos. **Comportamento das Mantas Autoprotégidas ao Impacto nas Chuvas de Granizo**. Sika Química Ltda. Lençóis Paulista, 2014.

Brasil. Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil. Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. **Anuário brasileiro de desastres naturais: 2013**. Brasília: CENAD, 2014. 106p.

CAPONE, T. **Considerações sobre as Consequências dos Desastres Hidrometeorológicos no Brasil de 2009 a 2011**. Trabalho de Graduação em Geografia. Rio Claro-SP, 2012.

CARVALHO, E.A.; DUARTE, E.T.V. **Ensaio de flexão: uma revisão dos modelos matemáticos empregados em sua análise**. 14º Congresso Brasileiro de Ciência e Engenharia de Materiais - CBECIMAT, anais. São Pedro, 2000.

CHANGNON, S. A.; CHANGNON, D.; HILBERG, S. D. **Hailstorms Across the Nation**. An atlas about hail and its damages. Illinois: 2009.

CAPBELL, F.C. **Structural Composite Materials**. Cleveland (USA): ASM International, 2010.

COSTA NETO, P.L.O. **Estatística**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

CRENSHAW, V.; KOONTZ J. D. **Hail: Sizing it Up!** Dallas, Texas, 2010.

CRENSHAW, V.; KOONTZ, J. D. **Simulated Hail Damage and Impact Resistance Test Procedures For Roof Coverings and Membranes**. Dallas, Texas, 2000.

CULLEN, W. C. **Hail Damage to Roofing: Assessment and Classification**. Proceedings of the Fourth International Symposium on Roofing Technology, NRCA/NIST, 1997, pp. 211–216.

FACTORY MUTUAL RESEARCH CORPORATION – FMRC. **Specification Test Standard for Impact Resistance Testing of Rigid Roofing Materials by Impacting with Freezer Ice Balls**. FM 4473. 2000.

GESSLER, S. E.; PETTY, S. E. Hail fundamentals and general hail-strike damage assessment methodology. in: PETTY, S. E., editor. **Forensic Engineering Investigation. Damage Assessments for Residential and Commercial structures**. New York: CRC Press, 2013.

GLOBO.COM/G1. **Chuva de granizo danifica milhares de casas no sul do Brasil**. 2015. Disponível em: <<http://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2015/09/chuva-de-granizo-danifica-milhares-de-casas-no-sul-do-brasil.html>> Acesso em: 01/05/2016.

GILARDI, G; SHARF, L. **Literature survey of contact dynamics modelling**. Mechanism and Machine Theory, 37, pp. 1213-1239, 2002.

GOLDSMITH, W. **Impact: theory and physical behaviour of colliding solids**. Unabridged Dover edition, New York: Dover Publications, 2001.

GRAHAM, M.S. **Concerns with impact testing**. Professional Roofing. Tech Today. 2008.

HIBBELER, R. C. **Dinâmica: Mecânica para engenharia** / R.C. Hibbeler; tradução Jorge Ritter; revisão técnica José Maria Campos dos Santos. 12ª ed. São Paulo : Pearson Prentice Hall, 2011.

HUTCHINSON, T.; KOONTZ, J.D. **Hail impact testing of EPDM roofs assemblies**. RCI 24th International Convention & Trade Show. Texas, 2009^a.
HUTCHINSON, T.; KOONTZ, J.D. **It came from hail**. School Planning and Management. Dallas, Texas, 2009^b.

KAMINSKI, P. C. **Mecânica Geral para Engenheiros**. 1ª ed. São Paulo, Editora Edgard Blücher LTDA, 2000.

KOONTZ, J. D. **The Effects of Hail on Residential Roofing Products**. Third International Symposium on Roofing Technology, 1991.

KULH'S CONTRACTING. **Images of hail damage**. Hopkins - Minnesota, 2012. Disponível em: < <http://www.kuhlscontracting.com> > Acesso em: 24/10/2016.

LAURIE, J.A. P. **Hail and its Effects on Buildings**. Research Report No. 176, NBRI, Pretoria, South Africa, 1960.

LEROY MERLIN. **Os diferentes tipos de telhas para a sua construção**. São Paulo, 2014. Disponível em: < <http://www.leroymerlin.com.br/dicas/os-diferentes-tipos-de-telhas-para-sua-construcao> > Acesso em: 13/04/2016.

MACAULAY, M. A. **Impact Engineering**. London: Chapman and Hall, 1987.

MARSHALL, T. P.; HERZOG, R. F.; MORRISON, S. J.; SMITH, S. R. **Hail Damage Threshold Sizes for Common Roofing Materials**. Haag Engineering Co. Dallas, Texas, p. 3.2, 2003^a.

MARSHALL, T. P.; HERZOG, R. F.; MORRISON, S. J.; SMITH, S. R. **Hail Damage to Tile Roofing**. Haag Engineering Co. Dallas, Texas, p. 9.2, 2003^b.

MEUCCI, R. D. **Experimentos sobre leis de conservação para o ensino de física no ensino médio baseados em tecnologias livres**. Dissertação de Mestrado em Ensino de Ciências – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

MEYERS, M.A.; CHAWLA, K.K. **Mechanical Behavior of Materials**. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press: 2009.

PERES, F.M. **Notas de aula da disciplina Comportamento Mecânico dos Materiais**. UTFPR/Londrina: 2016.

QIAO, P.; YANG, M.; BOBARU, F. **Impact Mechanics and High Energy Absorbing Materials: Review**. Faculty Publications from the Department of Engineering Mechanics. Paper 62, 2008.

QUARTOS. **Tipos de telhados, vantagens e desvantagens de cada um**. 2015. Disponível em: < <http://www.2quartos.com/tipos-telhados-vantagens-desvantagens-cada/>> Acesso em: 13/04/2016.

SCHÖN, C.G. **Mecânica dos Materiais: fundamentos e tecnologia do comportamento mecânico dos materiais**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

TELHAS POLLA. **Informações técnicas – Como instalar as telhas portuguesas**. Içara – Santa Catarina. Disponível em: < <http://www.telhaspolla.com.br/>> Acesso em: 30/04/2016.

UNDERWRITERS LABORATORIES - UL. **Impact Resistance of Prepared Roof Coverings**. UL 2218. 1996.

URQUIZA, R. P.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. S.; ELY, D. F.; PEREIRA, L.M.P.; COSTA, A. B. F. **Ocorrências de Granizo e Saraiva no Estado do Paraná**. XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Belo Horizonte, 2009.

WERLAND, A. P. **Análise da resistência mecânica de telhas de fibrocimento frente a tempestades de granizo**. Trabalho de conclusão de curso. Centro de Tecnologia – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, 2015.

ZANOTTO, E.D.; MIGLIORE JR., A.R. **Propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos: uma introdução**. *Cerâmica*, 37 (247), 1991.

APÊNDICE A – Resultados de Coeficiente de Restituição para Telhas Cerâmicas Romanas

Resultados de coeficiente de restituição de telhas cerâmicas romanas a partir de diferentes alturas de queda de uma esfera de aço de 1 polegada.

Amostra	Altura de lançamento (m)	Altura de restituição (m)	Coeficiente de Restituição (ϵ)	Média	Desvio Padrão
1	1,0	0,113	0,336	0,2754	0,05167
2		0,065	0,255		
3		0,048	0,219		
4		0,105	0,324		
5		0,059	0,243		
1	1,5	0,077	0,226	0,2484	0,10029
2		0,252	0,409		
3		0,108	0,268		
4		0,032	0,146		
5		0,056	0,193		
1	2,0	0,232	0,340	0,2372	0,06886
2		0,046	0,152		
3		0,113	0,238		
4		0,085	0,206		
5		0,125	0,250		
1	3,0	0,034	0,106	0,0888	0,00993
2		0,023	0,088		
3		0,021	0,084		
4		0,019	0,081		
5		0,022	0,085		

APÊNDICE B – Resultados do Ensaio de Flexão Simples em Telhas Cerâmicas Romanas

Resultados do ensaio de flexão simples em telhas cerâmicas romanas com amostras impactadas com apenas um impacto de diferentes alturas.

Amostra	Altura de lançamento (m)	Carga máxima de ruptura (Kgf)	Média (Kgf)	Desvio Padrão
1	0	199,8	186,55	84,24
2		98,3		
3		280,2		
4		100,0		
5		287,4		
6		153,6		
1	0,5	121,4	207,3	61,44
2		199,5		
3		173,2		
4		206,8		
5		303,5		
6		239,2		
1	1,0	189,5	164,0	32,37
2		206,0		
3		163,6		
4		118,8		
5		169,7		
6		136,6		
1	1,5	269,7	235,9	28,88
2		231,9		
3		218,7		
4		259,3		
5		245,3		
6		190,3		
1	2,0	266,5	187,2	71,81
2		136,1		
3		102,4		
4		148,3		
5		192,2		
6		277,5		

Amostra	Altura de lançamento (m)	Carga máxima de ruptura (Kgf)	Média (Kgf)	Desvio Padrão
1	2,5	203,2	232,4	49,64
2		315,6		
3		260,3		
4		235,3		
5		181,5		
6		198,2		
1	3,0	198,5	216,1	50,60
2		145,9		
3		230,2		
4		238,0		
5		189,2		
6		294,6		

Resultados do ensaio de flexão simples em telhas cerâmicas romanas com amostras não impactadas, impactadas uma única vez e impactadas três na região central de altura de 2 metros.

Amostra	Quantidade de Impacto	Carga máxima de ruptura (Kgf)	Média (Kgf)	Desvio Padrão
1	Sem impacto	199,8	186,55	84,24
2		98,3		
3		280,2		
4		100,0		
5		287,4		
6		153,6		
1	1 impacto	266,5	187,20	71,81
2		136,1		
3		102,4		
4		148,3		
5		192,2		
6		277,5		
1	3 impactos	103,2	139,63	39,80
2		156,0		
3		160,0		
4		103,0		
5		202,0		